

JOÃO BATISTA TAVARES JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO DE
BAIXO CUSTO EMPREGANDO SENSOR DE WEBCAM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador (es):

Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

Prof. Dr. Evaldo Ribeiro

CURITIBA
Agosto, 2012

Tavares Júnior, João Batista

Desenvolvimento de um protótipo de espectrorradiômetro de baixo custo empregando sensor de webcam / João Batista Tavares Júnior. - Curitiba, 2012.

131 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

Orientador: Daniel Rodrigues dos Santos

Coorientador: Evaldo Ribeiro

1. Sensoriamento remoto. 2. Espectroscopia. 3. Espectrorradiômetro.
I. Santos, Daniel Rodrigues dos. II. Ribeiro, Evaldo. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD – 621.3678

TERMO DE APROVAÇÃO

JOÃO BATISTA TAVARES JUNIOR

*"DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO DE
BAIXO CUSTO EMPREGANDO SENSOR DE WEBCAM"*

Tese nº 83 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



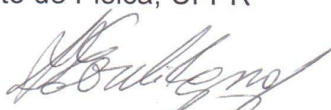
Prof. Dr. Evaldo Ribeiro
Departamento de Física, UFPR



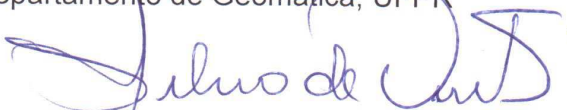
Prof. Dr. Marcio Peron Franco de Godoy
Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR



Prof. Dr. Ivo Alexandre Hümmelgen
Departamento de Física, UFPR



Prof. Dr. Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Sílvia Rogério Correia de Freitas
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Hideo Araki
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 23 de novembro de 2012.

A meus pais, João Batista Tavares e Sandra dos Santos Tavares,
a meu irmão, Frei Jaime Batista Tavares, ofm
aos meus avós paternos, Homero Tavares (in memoriam) e
Maria Coutinho Tavares (in memoriam) e maternos, Gercino
Raimundo dos Santos e Maria Lázara dos Santos
dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, bênção e proteção;

Agradeço a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente na realização deste trabalho. São merecedoras de menção honrosa:

Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos e Prof. Dr. Evaldo Ribeiro, pela orientação, apoio, incentivo, confiança e, principalmente, pela amizade;

Mônica Verali, secretária do CPGCG, pela amizade e excelente qualidade do seu trabalho;

Dr. Flavio Ponzoni e Lênio Galvão pelo curso ofertado durante minha estadia no INPE;

Prof. Dra. Joana Silveira por possibilitar o acesso ao PolyScience Modelo 9112 para efetuar a calibração dos termistores;

Amigos e colegas de trabalho do Setor de Agrimensura e Cartografia Ângelo, Fábio, João Olympio, Julierme, Lucia, Marcos, Marley, Miguel, Wellington, pelo incentivo, apoio e compreensão. Em especial à Lucia pelas revisões do texto e constantes estímulos e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho;

Amigos e colegas Marcos Basto, Tiago Caproni, Luciana e Rodrigo Nunes pelas dicas e auxílio no desenvolvimento do *firmware* instalado no sistema de refrigeração e do aplicativo de interface e processamento dos dados obtidos com o protótipo;

Os colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, principalmente, aos amigos Adriano, João Cortes, Marcos, Marly, Nadison, Rogers e Vagner pelo apoio e incentivo a mim prestado;

Funcionários da Biblioteca de Ciências e Tecnologia, em especial à Ângela e à Eliane;

Bruno, Ericson, e Vagner pela amizade e acolhimento em suas casa;

Valter Júnior e Eduardo Garcia pela confecção dos mecanismos empregados na construção do protótipo;

Prof. Vanda pela revisão geral do texto;

A família Moraes pelo carinho, apoio e incentivo para a conclusão deste trabalho. E, com singular referência, à Ana Carolina, por motivos especiais que a vida há de definir e mensurar com clareza de identificação e significado;

A coordenação do CPGCG pela confiança e acolhida;

Ao IFSULDEMINAS – *Campus* Inconfidentes por oferecer condições e incentivo para o término deste trabalho; e

A Capes, pela concessão de bolsa de Doutorados nos dois primeiros anos de estudos.

RESUMO

A presente tese de doutorado demonstra o desenvolvimento metodológico para a construção de um protótipo de baixo custo de espectrorradiômetro eficiente na obtenção da resposta espectral dos objetos com operação na faixa espectral do visível, e resolução espectral de até 10 nm, para funcionar em campo e em escritório, e que permita visualizar e registrar a imagem do objeto em estudo. Inicialmente foi desenvolvido um sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura do detector responsável pelo registro do fluxo de radiação eletromagnética difratado. Em seguida foi confeccionado um hardware para automatizar o sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura. Concluída a primeira etapa da metodologia, mecanismos foram projetados e usinados para fixarem os elementos ópticos na base do protótipo. Após a construção do equipamento, foi desenvolvido um aplicativo de interface e processamento de dados. Coeficientes de correção do efeito da corrente escura foram obtidos e implementados no aplicativo. A identificação dos pontos *blemishes* também foi realizada e seus efeitos foram corrigidos. Por fim, com base nos resultados obtidos com os testes e experimentos realizados, foi verificado que o protótipo desenvolvido opera na faixa espectral de 518 nm a 576 nm, sendo esta faixa coberta por 36 bandas com resolução espectral efetiva de 1,7 nm, atendendo aos objetivos iniciais do projeto.

Palavras chave: WebCam. FildSpec. Spectron SE 590. Sensor CCD. Sensor CMOS. Reflectância. Corrente escura. FWHM.

ABSTRACT

The present work reports on the development of a low-cost prototype for a spectroradiometer which should be suitable for visible-light region operation with spectral resolution of 10 nm. This prototype should be appropriate for both field and office operation, and in addition it should allow visualization and processing of the object image at the same time as the spectroscopic characteristics are acquired. The first steps were to develop a temperature controller and monitoring system for the spectral light detector, as well as the necessary hardware. After this, all the mechanical parts were fabricated and the optical system was assembled. A software for interfacing and data processing was developed and the prototype was fully characterized. Correction coefficients for dark current and identification of the detector blemish points were determined by experiment. After the final optical tests, the prototype was found to operate within the spectral interval from 518 nm to 576 nm, divided into 36 bands of 1.7 nm effective spectral resolution, achieving the main goals of this project.

Keywords: WebCam. FildSpec. Spectron SE 590. CCD. CMOS. Reflectance. Dark current. FWHM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – SPECTRON SE590.	9
FIGURA 02 – ASD FIELDSPEC.	10
FIGURA 03 – PASTILHA TERMOELÉTRICA DE EFEITO PELTIER.	11
FIGURA 04 – DIAGRAMA RESUMIDO DE UM MICROCONTROLADOR.	12
FIGURA 05 – DIAGRAMA GERAL DE UMA CLASSE DE ADC.	13
FIGURA 06 – FORMA DE ONDA EM ESCADA DE UM CONVERSOR A/D.	14
FIGURA 07 – CICLO T_{AD} DE CONVERSÃO A/D, COM TEMPO DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICO.	15
FIGURA 08 – ESQUEMA DA MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO - PWM.	16
FIGURA 09 – OBTENÇÃO DO CCD PELA ASSOCIAÇÃO LINEAR DE CAPACITORES MOS.	19
FIGURA 10 – OBTENÇÃO DO CCD PELA ASSOCIAÇÃO LINEAR DE CAPACITORES MOS.	20
FIGURA 11 – FILTRO DE BAYER.	21
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO ESPECTRORRADIÔMETRO PROPOSTO.	24
FIGURA 13 – VISTA DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA A MONTAGEM DO PROTÓTIPO.	26
FIGURA 14 – TERMISTOR 200 K Ω PARA TEMPERATURA AMBIENTE.	27
FIGURA 15 – A) BANHO TÉRMICO POLYSCIENCE MODELO 9112; E B) PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR.	27
FIGURA 16 – CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA MONTAGEM INICIAL DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO DETECTOR.	29
FIGURA 17 – RELAÇÃO TEMPERATURA X CORRENTE ELÉTRICA EM UMA PASTILHA TERMOELÉTRICA. SENDO T1 A TEMPERATURA DO LADO FRIO E T2 A TEMPERATURA DO LADO QUENTE.	31
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA, SENDO: T => TEMPERATURA ATUAL DO SISTEMA; T _{MÁX} =: TEMPERATURA MÁXIMA PERMITIDA; T _{MÍN} => TEMPERATURA MÍNIMA PERMITIDA; T _{N-1} => TEMPERATURA ANTERIOR.	32
FIGURA 19 – PINAGEM DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.	33
FIGURA 20 – ESQUEMA ELÉTRICO DA MONTAGEM DO OSCILADOR PRIMÁRIO DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.	34
FIGURA 21 – ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA DE FILTRAGEM E REGULAGEM DA TENSÃO DE ENTRADA NO HARDWARE DE AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO SISTEMA SENSOR.	35
FIGURA 22 – ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO +5V DO PIC18F4550.	36
FIGURA 23 – ESQUEMA ELÉTRICO DA MONTAGEM DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO TERRA DO PIC18F4550.	36

FIGURA 24 – ESQUEMA ELÉTRICO PARA APLICAR OPERAÇÃO DE RESET NO PINO \overline{MCLR} DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.	37
FIGURA 25 – ESQUEMA DO CIRCUITO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA.	37
FIGURA 26 – ESQUEMA DO CIRCUITO PROPOSTO PARA A INTERFACE DE SAÍDA DE INFORMAÇÕES DO PIC18F4550.	39
FIGURA 27 – CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA MONTAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	40
FIGURA 28 – ESQUEMA DO CIRCUITO DE CONTROLE DA VELOCIDADE DO VENTILADOR. ---	41
FIGURA 29 – ESQUEMA DO CIRCUITO DE CONTROLE DA ENERGIA ELÉTRICA ENTREGUE À PASTILHA TERMOELÉTRICA.	42
FIGURA 30 – A) LENTE BI-CONVEXA B) LENTE PLANO-CONVEXA. ONDE: EFL = DISTÂNCIA FOCAL EFETIVA; R1 E R2 = RAIO; ET = ESPESSURA DA BORDA; CT = ESPESSURA DO CENTRO.	43
FIGURA 31 – CURVA DA EFICIÊNCIA TÍPICA DA REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DO ESPELHO SEMITRASPARENTE.	44
FIGURA 32 – ESPELHO SEMI-TRASPARENTE.	44
FIGURA 33 – WEBCAM EROS DA BRIGHT UTILIZADA PARA CAPTURAR A IMAGEM DO OBJETO OBSERVADO.	45
FIGURA 34 – FENDA DE ABERTURA DE LUZ NO ESPECTRORRADIÔMETRO.	45
FIGURA 35 – CURVA DA EFICIÊNCIA TÍPICA DA REDE DE DIFRAÇÃO OTIMIZADA (BLAZE) PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DE 750 NM.	46
FIGURA 36 – ÂNGULO BLAZE.	47
FIGURA 37 – WEBCAM DOTSTORE DA MULTILASER UTILIZADA PARA REGISTRAR O FLUXO DE RADIAÇÃO DIFRATADO.	47
FIGURA 38 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.	49
FIGURA 39 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMITRASPARENTE.	50
FIGURA 40 – SUPORTE PARA FIXAR A WEBCAM RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO.	50
FIGURA 41 – FENDA DE ABERTURA DE LUZ NO ESPECTRORRADIÔMETRO.	51
FIGURA 42 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DA REDE DE DIFRAÇÃO.	52
FIGURA 43 – SUPORTE PARA FIXAR A LENTE QUE FOCALIZA O FLUXO DE RADIAÇÃO DIFRATADO NO DETECTOR NA BASE DO PROTÓTIPO.	52
FIGURA 44 – FIXAÇÃO DO DETECTOR DE COLETA DO FLUXO DE REM DIFRATADO.	53
FIGURA 45 – FLUXOGRAMA DAS FUNÇÕES DO APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO.	54
FIGURA 46 – CORREÇÃO DO EFEITO DA CORRENTE ESCURA.	55

FIGURA 48 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA AVALIAR O EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO DETECTOR.-----	56
FIGURA 48 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA DETERMINAR A POSIÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINE AS FAIXAS ESPECTRAIS.-----	58
FIGURA 49 – ELABORAÇÃO DO GRÁFICO PARA DEFINIR A POSIÇÃO DAS FAIXAS ESPECTRAIS.-----	59
FIGURA 50 – INTERVALO ESPECTRAL DEFINIDO COM BASE NO CRITÉRIO DA LARGURA A MEIA ALTURA (FWHM).-----	59
FIGURA 51 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR.-----	61
FIGURA 52 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO UTILIZANDO PASTILHA TERMOELÉTRICA. A) MONTAGEM I COM A PASTILHA TERMOELÉTRICA P91-I; B) MONTAGEM I COM A PASTILHA P137-I; C) MONTAGEM II COM AS PASTILHAS P137-I E P137-II; D) MONTAGEM COM AS PASTILHAS P137-I, P137-II E P91-I. SENDO: T1 A TEMPERATURA DO LADO FRIO E T2 A TEMPERATURA DO LADO QUENTE -----	63
FIGURA 53 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO APLICANDO UMA CARGA ELÉTRICA DE 12 V AO VENTILADOR.-----	64
FIGURA 54 – A) DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS ELETRÔNICOS E DESENHO DAS TRILHAS. B) ESBOÇO DAS TRILHAS A SEREM CONFECCIONADAS NA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.-----	66
FIGURA 55 – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO APÓS CORROSÃO.-----	66
FIGURA 56 – PLACA COM OS ELEMENTOS ELETRÔNICOS SOLDADOS.-----	67
FIGURA 57: TRECHO DA ROTINA PARA EFETUAR A LEITURA DO CANAL ANALÓGICO.-----	68
FIGURA 58: INSTRUÇÕES IMPLEMENTADA PARA A TRANSFORMAÇÃO ANALÓGICO/DIGITAL.-----	69
FIGURA 59: CÓDIGO DE TRANSFORMAÇÃO DO VALOR DA BASE 10 PARA A BASE 2.-----	69
FIGURA 60 – ACLOPAMENTO DO TERMISTOR DE 200 K Ω AO MULTÍMETRO E O DE 10 K Ω AO HARDWARE.-----	72
FIGURA 61 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR DE 10 K Ω ACOPLADO AO HARDWARE.-----	73
FIGURA 62 – SISTEMA PARA FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA AO PROTÓTIPO.-----	74
FIGURA 63 – MECANISMO PARA FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMI-TRANSPARENTE AO PROTÓTIPO.-----	75
FIGURA 64 – SISTEMA PARA FIXAÇÃO DO DETECTOR RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO.-----	75
FIGURA 65 – FENDA DE ENTRADA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.-----	76
FIGURA 66 – MECANISMO PARA FIXAR A REDE DE DIFRAÇÃO AO PROTÓTIPO.-----	77
FIGURA 67 – MECANISMO PARA ACOPLAR A LENTE DE FOCALIZAÇÃO DO FLUXO DE REM DIFRATADO NO DETECTOR.-----	77

FIGURA 68 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E FIXAÇÃO DO DETECTOR QUE REGISTRA O FLUXO DE REM DIFRATADO.	78
FIGURA 69 – VISTA INTERNA DO PROTÓTIPO.	79
FIGURA 70 – VISTA DO PROTÓTIPO.	79
FIGURA 71 – ARQUITETURA DO APLICATIVO DE PROCESSAMENTO E VISUALIZAÇÃO DOS DADOS.	80
FIGURA 72 – VISUALIZAÇÃO DA ÁREA QUE PREENCHE O CAMPO DE VISADA DO PROTÓTIPO E DO FLUXO DE REM DIFRATADO.	81
FIGURA 73 – VISUALIZAÇÃO DOS DADOS NOS DISPLAY DE VISUALIZAÇÃO ESTÁTICA.	81
FIGURA 74 – VISUALIZAÇÃO DO GRÁFICO.	82
FIGURA 75 – FREQUÊNCIA DE VALORES MÉDIO DE ND E DE SEUS RESPECTIVOS DESVIO PADRÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS.	85
FIGURA 76 – MAPA DA CORRENTE ESCURA APÓS APLICAR A TÉCNICA DE CONTRASTE DE IMAGEM.	87
FIGURA 77 – FREQUÊNCIA DE VALORES MÉDIO DO ND E DE SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO PARA O DETECTOR DO FLUXO DE REM DIFRATADO.	88
FIGURA 78 – IMAGENS DOS PONTOS BLEMISHES NAS BANDAS RGB.	89
FIGURA 79 – COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PONTOS BLEMISHES.	90
FIGURA 80 – IMAGEM DA FONTE DE LUZ BRANCA OBTIDA COM O PROTÓTIPO.	90
FIGURA 81 – IMAGEM DA FAIXA ESPECTRAL REGISTRADA.	91
FIGURA 82 – IMAGEM DA FENDA DE ABERTURA DO ESPECTROFOTÔMETRO AJUSTADO PARA EMITIR O COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM.	92
FIGURA 83 – IMAGEM D FLUXO DE REM DE COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM DIFRATADO.	92
FIGURA 84 – COLUNAS E BANDAS SENSIBILIZADAS PELO FLUXO DE REM DE COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM.	93
FIGURA 85 – IMAGEM DA FENDA DE ABERTURA DO ESPECTROFOTÔMETRO COM A INTENSIDADE DO FLUXO DE REM AUMENTADA.	94
FIGURA 86 – IMAGEM DO FLUXO DE REM DIFRATADO APÓS AUMENTAR SUA INTENSIDADE.	95
FIGURA 87 VALORES APÓS A ELIMINAÇÃO DOS DADOS ORIUNDAS DA ABERRAÇÃO ESFÉRICA.	95
FIGURA 88 – GRÁFICO REPRESENTANDO A FUNÇÃO DE RESPOSTA DOS FILTROS DE RADIAÇÃO VISÍVEL DISPOSTOS SOBRE O CCD DA CÂMARA DSC – F828.	96
FIGURA 89 – GRÁFICO REPRESENTANDO A FUNÇÃO DE RESPOSTA DOS FILTROS DE RADIAÇÃO VISÍVEL DISPOSTOS SOBRE O CCD DA CÂMARA DSC – F828, COM A FAIXA ESPECTRAL REGISTRADA PELO PROTÓTIPO SOBRE O MESMO.	97
FIGURA 90 – IMAGENS DE UM OBJETO POSICIONADO A 5 CM (A), 20 CM (B) E 40 CM (C) DA LENTE COLETORA DE REM.	100

FIGURA 91 – IMAGEM DA INTENSIDADE DO FLUXO DE REM UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO.	101
FIGURA 92 – IMAGEM DA INTENSIDADE DO FLUXO DE REM DIFRATADO UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO ONDE AS SETAS EM AZUL INDICAM ALGUNS DOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS SOBRE O DETECTOR.	101
FIGURA 93 – REPRESENTAÇÃO EM GRÁFICO DO FLUXO DE REM DIFRATADO UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO. FLUXO COM BAIXA INTENSIDADE (A) E ALTA INTENSIDADE (B).	102
FIGURA 94 – MEDIDA DO FLUXO DE REM REFLETIDO POR UMA SUPERFÍCIE ISOTROPICA.	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 01: VALORES DOS COEFICIENTES AJUSTADOS PARA A EQUAÇÃO 6.	61
TABELA 02: VALORES DE Q_{MAX} , I_{MAX} E ΔT_{MAX} OBSERVADO NA FIGURA 20.	63
TABELA 03: CONFIGURAÇÃO DA INTERFACE DE SAÍDA PARA O VALOR DIGITAL 500.	67
TABELA 04: VALORES DOS COEFICIENTES AJUSTADOS PARA A EQUAÇÃO 07.	73
TABELA 05: VALORES DO ND MÉDIO E DE DESVIO PADRÃO QUE APARECERAM COM MAIOR FREQÜÊNCIA.	85
TABELA 06: POSIÇÃO E LARGURA DAS FAIXAS ESPECTRAIS.	98
TABELA 07: MATERIAIS EMPREGADOS NA CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO COM SEUS RESPECTIVOS PREÇOS.	104

LISTA DE SIGLAS

CCD - Charge Coupled Devices;
CMOS - Complementary metal-oxide-semiconductor;
REM – Radiação eletromagnética;
A/D - Analógico digital;
ND – Número digital;
FWHM - Largura à meia altura
VNIR – Visible-near-infrared;
SWIR – Short-wave-infrared;
FOV – Field of vision;
ASD – Analytical Spectral Device.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	PROPOSIÇÃO	4
1.4	OBJETIVOS	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DA ESPECTROSCOPIA E SUAS APLICAÇÕES	7
2.2	ESPECTRORRADIÔMETRO	8
2.3	TERMISTOR	10
2.4	PASTILHA TERMOELÉTRICA	11
2.5	MICROCONTROLADOR	11
2.6	CONVERSÃO A/D	13
2.7	PWM (MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO)	15
2.8	REDE DE DIFRAÇÃO	16
2.9	LENTE DELGADA PLANO-CONVEXA	17
2.10	ABERRAÇÕES MONOCROMÁTICAS	18
2.11	SENSOR CCD (<i>CHARGE COUPLED DEVICE</i>) e CMOS (<i>COMPLEMENTARY METAL OXIDE SEMICONDUCTOR</i>)	19
2.12	PRINCIPAIS RUÍDOS DE UM DETECTOR DO TIPO CCD E/OU CMOS	20
2.13	FILTRO DE BAYER	21
3	MATERIAL E MÉTODO	23
3.1	PROTÓTIPO De ESPECTRORRADIÔMETRO	23
3.2	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO DETECTOR E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA	27
3.2.1	Constituição Do Sistema De Monitoramento Da Temperatura	27
3.2.2	Sistema de Refrigeração	28
3.2.3	Automação Do Sistema De Refrigeração E Monitoramento Da Temperatura	31
3.2.3.1	Sinal de <i>clock</i>	33
3.2.3.2	Fonte de alimentação do PIC18F4550	34
3.2.3.3	Circuito de <i>reset</i> para o microcontrolador PIC18F4550	36
3.2.3.4	Esquema do circuito eletrônico para o sistema de monitoramento de temperatura	37
3.2.3.5	Esquema do circuito eletrônico proposto para o controle da energia elétrica aplicada ao ventilador e pastilha termoeletrica	40
3.3	SISTEMA ÓPTICO	42
3.3.1	Lentes Para Coleta e Focalização Da Radiação Eletromagnética	42
3.3.2	Sistema Para Visualização do Objeto	44
3.3.3	Fenda De Entrada De Luz No Espectrorradiômetro	45
3.3.4	Individualização Do Espectro Eletromagnético	46
3.3.5	Detecção Do Fluxo De Radiação Eletromagnética Difrato	47
3.4	MONTAGEM DO PROTÓTIPO	48
3.4.1	Suporte Para Fixação Da Lente Coletora De Radiação Eletromagnética	49
3.4.2	Suporte Para Fixação Do Espelho Semi-Transparente	49

3.4.3	Suporte Para Fixar A WebCam Responsável Pelo Registro Da Imagem Do Objeto Em Estudo	50
3.4.4	Fixação Da Fenda De Entrada De REM No Espectrorradiômetro	51
3.4.5	Suporte Para Fixar A Rede De Difração	51
3.4.6	Suporte Para Fixação Da Lente Que Focaliza O Fluxo De Radiação Difrato No Detector	52
3.4.7	Fixação Do Detector Do Fluxo De REM Difrato	53
3.5	APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO	53
3.6	OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CORREÇÃO DO EFEITO DA CORRENTE ESCURA E IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS <i>BLEMISHES</i>	56
3.7	IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINEM AS FAIXAS ESPECTRAIS	57
3.8	SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO	60
3.9	VALOR EM REAIS DESPENDIDO NA CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR DESACOPLADO DO <i>HARDWARE</i>	60
4.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS Q_{max} , I_{max} E ΔT_{max} DA PASTILHA TERMOELÉTRICA	62
4.3	AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA	65
4.4	CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR ACOPLADO AO <i>HARDWARE</i>	71
4.5	FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE REM	74
4.6	FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMI-TRANSPARENTE	75
4.7	FIXAÇÃO DA WEBCAM RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO	75
4.8	FIXAÇÃO DA FENDA DE ENTRADA DE REM	76
4.9	FIXAÇÃO DA REDE DE DIFRAÇÃO	76
4.10	FIXAÇÃO DA LENTE DE FOCALIZAÇÃO DO FLUXO DE REM DIFRATADO NO DETECTOR	77
4.11	FIXAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E DO DETECTOR DO FLUXO DE REM DIFRATADO	78
4.12	ELEMENTOS ACOPLADOS NA BASE DO PROTÓTIPO	78
4.13	APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DE DADOS	79
4.14	OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CORREÇÃO DA CORRENTE ESCURA E IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS <i>BLEMISHES</i> DO DETECTOR RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DO FLUXO DE REM DIFRATADO	82
4.15	IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINEM AS BANDAS ESPECTRAIS	90
4.16	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
4.16.1	Avaliação Do Sistema De Visualização Do Objeto Em Estudo	99
4.16.2	Sensitividade Do Protótipo	100
4.17	CUSTO FINAL DO PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO DESENVOLVIDO	104
4.18	COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE O PROTÓTIPO	105
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
5.1	CONCLUSÕES	106
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
6	PUBLICAÇÕES E TRABALHOS EM ANDAMENTO	109
	BIBLIOGRAFIA	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conhecimento das propriedades físico-químicas e biológicas dos objetos da superfície é de fundamental importância para um profissional da área de Sensoriamento Remoto, uma vez que delas resulta a resposta espectral desses objetos. Essas informações podem ser obtidas com o emprego do espectrorradiômetro de campo, o qual é um equipamento munido de lentes e/ou cabo de fibra óptica, sistema de difração de radiação eletromagnética (REM), detectores e software de processamento e análise de dados. Seu objetivo é coletar informações *in situ* e transformá-las em dados úteis para, por exemplo, efetuar o mapeamento do tipo de materiais utilizados na construção urbana e suas condições.

O uso destes equipamentos tem sido restrito em decorrência do alto custo de aquisição e manutenção, dificultando a realização de trabalhos científicos e educacionais até mesmo pelas instituições que detêm sua posse. De acordo com Milton et al. (2009) o Reino Unido possui um posto munido com espectrorradiômetro de campo para atender grupos de pesquisas. No entanto, devido às regras impostas para a sua utilização, o uso deste equipamento continuou restrito. Já no Brasil são poucas as instituições civis e militares que possuem espectrorradiômetro de campo. O custo elevado dos espectrorradiômetros de campo se deve, em parte, ao preço dos elementos que o compõem, bem como à tecnologia empregada para a sua configuração e eliminação dos ruídos gerados, em decorrência da sensibilidade à variação térmica dos materiais empregados na sua concepção.

Com o avanço tecnológico há um crescente aumento da busca por soluções econômicas. Uma destas soluções são os sensores de imageamento passivo, que se constitui em uma solução baseada em sensores CCD e CMOS. Estes sensores estão presentes em todos os sistemas que registram a intensidade do fluxo de REM refletido e/ou emitido por uma determinada superfície, como por exemplo, câmaras fotográficas, sistema de visão noturna, mecanismos de análise de qualidade da pureza de produtos e webcam.

Os dispositivos a que se fez referência são compactos, leves, de alta resolução geométrica e radiométrica, baixo custo e flexíveis. Dentre os sensores disponíveis, o uso de câmaras digitais, que registram respostas espectrais na faixa espectral correspondente ao visível e infravermelho, tem ganhado popularidade na comunidade acadêmica. Além das câmaras digitais, a webcam também tem despertado o interesse desta comunidade, sendo bastante empregada, por exemplo, em sistemas de realidade virtual, sistema de reconhecimento de território e mecanismos de comunicação. A busca de webcam com melhor resolução geométrica e radiométrica, proporcionou o desenvolvimento de sistemas de alta definição, alta sensibilidade e baixo peso. Além disso, alguns destes mecanismos também permitem a obtenção de imagens noturnas. Para tanto, foram introduzidos LEDs (Diodo emissor de luz) emissores de luz branca e/ou de infravermelho próximo em seu sistema.

O LED é um dispositivo capaz de emitir um fluxo de REM na faixa do visível e ou infravermelho próximo bem definido. Este dispositivo é facilmente encontrado no mercado, sendo de baixo custo, baixo consumo de energia elétrica e vida útil longa. Atualmente, tem sido amplamente empregado no desenvolvimento de produtos eletrônicos e até mesmo automobilísticos.

Um dos gargalos na construção de um espectrorradiômetro relaciona-se à obtenção dos coeficientes de transformação do valor físico para o valor digital. Estes coeficientes são obtidos pela calibração radiométrica do detector do fluxo de REM difratado. O processo de calibração radiométrica não é um procedimento trivial, exigindo o uso de um equipamento que emita um fluxo de REM conhecido e bem definido. Este equipamento também deve conter mecanismos que possibilitam controlar e conhecer a intensidade do fluxo de REM emitido pelo mesmo. Outro ponto importante na realização da calibração radiométrica refere-se à necessidade de se obter coeficientes únicos para a eliminação de ruídos.

Considerando estas questões, e frente à necessidade de se desenvolver um equipamento eficiente na obtenção da resposta espectral dos objetos, foi proposto o desenvolvimento de um protótipo de espectrorradiômetro operacional em campo e escritório, com sistema que permita visualizar e registrar as imagens e que seja de baixo custo.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um espectrorradiômetro de campo portátil propicia avanços nas técnicas de espectroscopia aplicada ao Sensoriamento Remoto. O primeiro espectrorradiômetro de campo portátil, antecessor da linha FieldSpec, foi mundialmente conhecido na década de 1990. Vinte anos depois podem ser encontrados no mercado modelos mais rápidos e precisos, fornecendo qualidade e eficiência na aquisição de dados espectrais. O espectrorradiômetro comercial faz parte de um sistema composto por uma série de acessórios, sendo estes definidos de acordo com a finalidade da aplicação. Para se ter idéia, em novembro de 2011 foi lançada a versão mais recente deste equipamento, cujo custo alcança um valor na ordem de U\$ 65 mil. Ao incluir alguns de seus acessórios, tal dispositivo pode ultrapassar o valor de U\$ 150 mil. Outro ponto importante: a garantia dada pelo fabricante na aquisição do equipamento é apenas de um ano, além de que qualquer tipo de manutenção e calibração deste equipamento somente é realizada pelo seu fabricante. No entanto, alguns mecanismos possuem uma vida útil curta e necessitam ser periodicamente substituídos, tornando o processo moroso e de alto custo.

A qualidade da informação fornecida pelo equipamento faz com que ele seja aceito mundialmente nos trabalhos de pesquisa, uma vez que está associado à multiplicidade de aplicações nas diversas áreas do conhecimento, tais como sensoriamento remoto, mineração, agricultura, processos laboratoriais e industriais, uso militar, entre muitas outras.

Muito se pode avançar em pesquisas relacionadas com a área de Sensoriamento Remoto quando se possui um espectrorradiômetro de campo para tais finalidades. No entanto, o elevado custo tanto na obtenção do equipamento quanto na sua manutenção, tem restringido seu uso a técnicos especializados na aquisição e processamento das informações.

Com o intuito de aumentar as possibilidades de trabalhos na área de espectroscopia, alcançar avanços nas áreas de desenvolvimento industrial de sistemas sensores, educação em programas de pós-graduação e cursos acadêmicos (desenvolvimento de recursos humanos) que fazem uso de técnicas de sensoriamento remoto, faz-se necessário o desenvolvimento de

espectrorradiômetros de baixo custo. Assim, a disponibilidade no mercado e aquisição de um espectrorradiômetro de baixo custo, para a aplicação nas áreas referidas anteriormente, é de fundamental importância. E, considerando-se as possibilidades de construção de novos equipamentos e desenvolvimento de métodos e software específico para coleta de dados em campo e/ou laboratório, é extremamente importante adquirir *know-how* sobre o seu funcionamento que somente se tornará factível através do desenvolvimento de pesquisa básica.

Outras razões que justificam o desenvolvimento deste trabalho são: a demanda por redução de custo do espectrorradiômetro e desenvolvimento tecnológico brasileiro, o desenvolvimento e aquisição do conhecimento da nova tecnologia para fins de monitoramento e mapeamento cuja a relevância científica é comprovada devido à importância dispensada pela ISPRS *Commission I – Image data acquisition Sensors and Platforms - design, construction, characterization, and installation of imaging and non-imaging sensors* (ISPRS, 2012), aos objetos de estudo deste trabalho.

1.3 PROPOSIÇÃO

O sucesso no desenvolvimento de um espectrorradiômetro depende de vários fatores, o que levam a alguns questionamentos:

- Seria possível desenvolver um protótipo de espectrorradiômetro de baixo custo que atenda às especificações de precisão espectral e radiométrica?
- Como minimizar a distorção óptica para que sejam atendidas as peculiaridades técnicas de um espectrorradiômetro?
- Como definir a resolução espectral e a faixa espectral de operação?
- Seria possível aplicar mecanismos de refrigeração eficientes de baixo consumo de energia elétrica que venham contribuir na estabilização dos ruídos provocados pela variação térmica nos materiais empregados na sua concepção?

Os indicativos que contribuíram para dar suporte ao questionamento levantado são os que passam a ser considerados:

- há grande oferta de componentes eletrônicos e detectores, tais como: LEDs, capacitores, resistores, termistores, microcontroladores, pastilha termoelétrica, detectores imageadores;
- existe uma variedade de elementos ópticos com qualidade disponível no mercado;
- existem mecanismos capazes de refrigerar e manter a temperatura do detector, como por exemplo, a pastilha termoelétrica de efeito peltier;
- existem mecanismos de monitoramento da temperatura que podem ser desenvolvidos empregando elementos eletrônicos, como por exemplo, termistores e microcontroladores.

Estes apontamentos nortearam a proposta da pesquisa desenvolvida neste trabalho.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivo geral desenvolver um protótipo de baixo custo de um espectrorradiômetro eficiente na obtenção da resposta espectral dos objetos com operação na faixa espectral do visível e resolução espectral de até 10 nm, para funcionar em campo e em escritório, e que permita visualizar e registrar a imagem do objeto em estudo. O protótipo desenvolvido visa a aplicações, como:

- caracterização da resposta espectral dos objetos da superfície;
- obtenção de dados para o apoio à calibração radiométrica de sensores orbitais e/ou aéreo transportados;
- outras aplicações de interesse que vierem a surgir com o desenvolvimento do protótipo.

Para alcançar o objetivo proposto, são definidos os seguintes objetivos específicos, a saber:

- desenvolver um sistema automatizado para refrigerar e monitorar a temperatura do detector;
- desenvolver um arranjo óptico que obtenha de forma simples a resposta espectral dos objetos;
- montar e acoplar um detector para registro das informações;

- determinar os coeficientes de correção de ruídos gerados no detector;
- identificar qual é a parte do detector sensibilizada por cada faixa espectral;
- desenvolver um aplicativo de interface e processamento dos dados obtidos com o protótipo;
- realizar experimentos com dados reais;
- analisar e discutir os resultados obtidos.

O desenvolvimento deste projeto contou com a parceria entre:

- o Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná;
- o Laboratório de Propriedades Ópticas do Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná;
- a Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Câmpus Inconfidentes.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica; no capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos; no capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão; no capítulo 5, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros; no capítulo 6, as publicações e trabalhos em andamento e no capítulo 7, a bibliografia utilizada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DA ESPECTROSCOPIA E SUAS APLICAÇÕES

De acordo com Goetz (2009), as primeiras imagens hiperespectrais foram obtidas na década de 70. A sua produção foi incentivada após a realização de medições em campo, para obtenção de respostas espectrais, em apoio à análise de dados do Landsat1. O primeiro sistema desenvolvido foi o *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), criado pela NASA/JPL em 1983. Em seguida foi desenvolvido o *Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) sendo, na época, o principal fornecedor de dados hiperespectrais de alta qualidade. Atualmente, o sistema CASI 1500 pode ser considerado o melhor sensor hiperespectral aerotransportado, adquirindo dados com alta resolução espacial e espectral.

Os dados coletados com os sensores imageadores hiperespectrais vêm sendo aplicados e explorados em diversas áreas do conhecimento (ASNER et al., 2008; BELLINASSO et al., 2010; BEM-DOR et al., 2009; CHOE et al., 2008; COLOMBO et al., 2008; COMBE et al., 2008; DEMATTÊ et al., 2010; FARIFTEH et al., 2007; HEIDEN et al., 2007; KALACSKA et al., 2007; LAGACHERIE et al., 2008; LUCAS et al., 2008; MOREIRA, et al., 2002; SOUZA JUNIOR et al., 2008; entre outros).

A exploração destes dados se deu com o desenvolvimento de softwares específicos, por exemplo, o software ENVI, para processamento destas informações, a concepção de espectrorradiômetro de campo e de algoritmos de correção atmosférica.

Milton et al. (2007) relataram o progresso na espectroscopia de campo, que tem se estabelecido como uma importante técnica para caracterizar a reflectância de superfícies naturais *in situ*, para o apoio de calibração de sensores aerotransportados e de satélites como um meio de caracterização de pequenas áreas (por exemplo, folhas, pedras) e de cenas compostas (por exemplo, copas de vegetação). Os autores também reportam às perspectivas para o futuro da espectroscopia de campo, considerando-a como um atributo cada vez mais importante para a análise de dados espectrais baseado em medição global e

sistemas de monitoramento da superfície, especificamente através da sua correlação em modelos numéricos.

2.2 ESPECTRORRADIÔMETRO

Dentre os espectrorradiômetros de campo disponíveis no mercado, destacam-se o Spectron SE 590 e o *Analytical Spectral Device* (ASD) FieldSpec como os mais conhecidos e empregados.

Um espectrorradiômetro coleta o fluxo de radiação eletromagnética (REM) refletido pelos objetos e transforma-o em um sinal passível de ser convertido em informações sobre o mesmo. Esta conversão ocorre nos elementos do detector, o qual varia de acordo com a região do espectro em que se deseja registrar a intensidade do fluxo de REM.

Os elementos do detector transformam o fluxo de radiação eletromagnética em carga elétrica, que é esta armazenada em cada um de seus elementos. A quantidade de carga elétrica gerada em cada elemento do detector é proporcional à quantidade de energia incidente. A carga elétrica confinada em cada elemento é mensurada pelo microprocessador do hardware, que o suporta e controla o seu funcionamento. Após a transformação da informação analógica para digital (A/D), o valor obtido é expresso em número digital (ND). A acurácia da medida da quantidade de carga elétrica é maior quanto maior for o número de bits do detector.

O Spectron SE590 (Figura 01) é um espectrorradiômetro que opera na faixa espectral de 350 a 1150 nm com uma resolução espectral efetiva de 8 nm. O fluxo de radiação eletromagnética coletado é difratado numa rede de difração. O fluxo difratado é registrado por um sensor do tipo CCD (*Charge Coupled Devices*) linear de 256 detectores. Os sinais gerados nos detectores são amplificados e digitalizados por uma unidade de processamento constituída com microprocessadores com resolução de 12 bits (WALTER-SHEA, 2012).

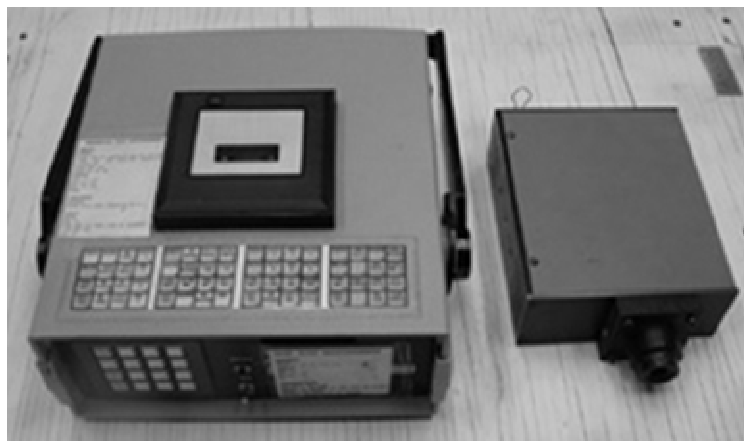


FIGURA 01 – SPECTRON SE590.

FONTE: Walter-Shea (2012)

O campo de visão (FOV – *Field of Vision*) padrão desta unidade é de 6°, podendo ser modificado para 1°, 15° e 180° (coletor cosseno), bastando para tanto mudar o tipo de lente empregada.

Em seu sistema, há um obturador que fecha a abertura de entrada de radiação eletromagnética deixando sua parte interna escura e permitindo medir e armazenar os ruídos gerados pelo efeito da variação térmica para, posteriormente, ser subtraído de todos os 256 elementos (detectores).

Já o espectrorradiômetro da linha FieldSpec (Figura 02) possui um detector VNIR (*Visible-near-infrared*) e dois detectores SWIR (*Short-Wave-Infrared*) de arseneto de índio e gálio (InGaAs), os quais são refrigerados com dispositivos termoelétricos, operando nas faixas espectrais do visível e infravermelho próximo oferecendo uma cobertura espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral efetiva de 3 nm para a faixa do visível. Esse equipamento, assim como o Spectron SE590, não disponibiliza nenhum mecanismo que permita registrar a imagem do objeto em estudo (DEVICES INC, 2012).



FIGURA 02 – ASD FIELDSPEC.

FONTE: Devices Inc (2012).

A coleta do fluxo de radiação eletromagnética é realizada por uma pistola conectada a um cabo de fibra óptica. Os dados obtidos são mostrados em tempo real em um microcomputador que está acoplado ao equipamento.

Na comparação entre os espectrorradiômetros citados, o ASD FieldSpec apresenta: 1) Sistema de refrigeração; 2) Detecta comprimentos de onda compreendidos numa faixa espectral de maior amplitude que o Spectron SE 590; 3) Permite visualizar os resultados no momento da coleta em campo; 4) Utiliza um cabo de fibra óptica para efetuar a coleção do fluxo de REM.

2.3 TERMISTOR

Um sensor termistor é um dispositivo eletrônico sensível à variação da temperatura, sendo este constituído de material semicondutor. Ele pode ser classificado em duas classes: semicondutores de óxido de metal; e de cristal simples. Os termistores podem apresentar diferentes tamanhos e formas geométricas. As mais comuns são circular, cilíndrica e plana. Eles são utilizados para medir e monitorar temperaturas do ar ambiente, de líquidos, de superfícies sólidas e de radiações. A amplitude da faixa de operação de um termistor, em primeira ordem, depende da energia de *gap* do material utilizado, sendo os termistores de óxido de metal os mais comuns para medir temperaturas entre -73 °C a 426 °C (SZE e NG, 2007).

2.4 PASTILHA TERMOELÉTRICA

A pastilha termoeétrica é um dispositivo concebido pela junção de elementos semicondutores tipo p e tipo n soldados entre duas placas cerâmicas, eletricamente em série e termicamente em paralelo (Figura 03).

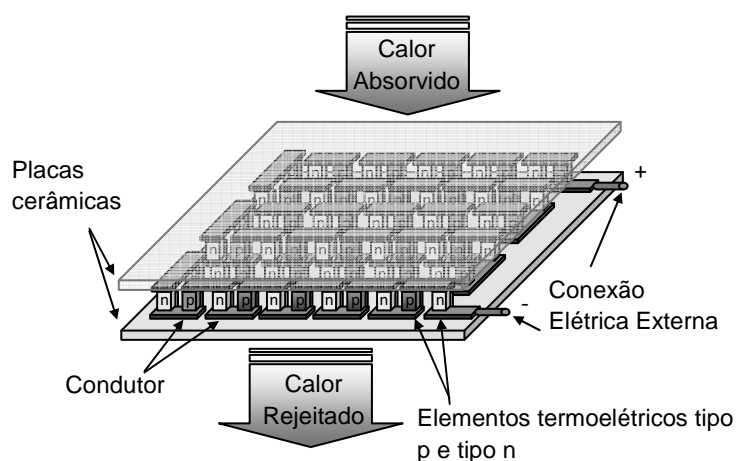


FIGURA 03 – PASTILHA TERMOELÉTRICA DE EFEITO PELTIER.

Seu princípio de operação é regido pela teoria do efeito Peltier, pelo qual a corrente elétrica, ao passar de um elemento tipo p para um elemento tipo n, transforma a energia elétrica em energia calorífica produzindo calor na junção. Por outro lado, se a corrente elétrica passar do elemento tipo n para o elemento do tipo p, a energia calorífica é transformada em energia elétrica, reduzindo a temperatura na junção, enquanto absorve o calor do ambiente. O calor absorvido nesta junção é transferido para a outra junção pelos elétrons, emitindo-a no outro lado (lado quente) (DUCKWOORTH, 1960).

2.5 MICROCONTROLADOR

Microcontroladores são pequenos dispositivos eletrônicos concebidos basicamente a partir da junção de uma Unidade Central de Processamento – CPU, memória de dados e de programas, e de portas E/S, I²C, SPI, USART, PWM, etc (FIGURA 04) (MIRYADAIRA, 2009).

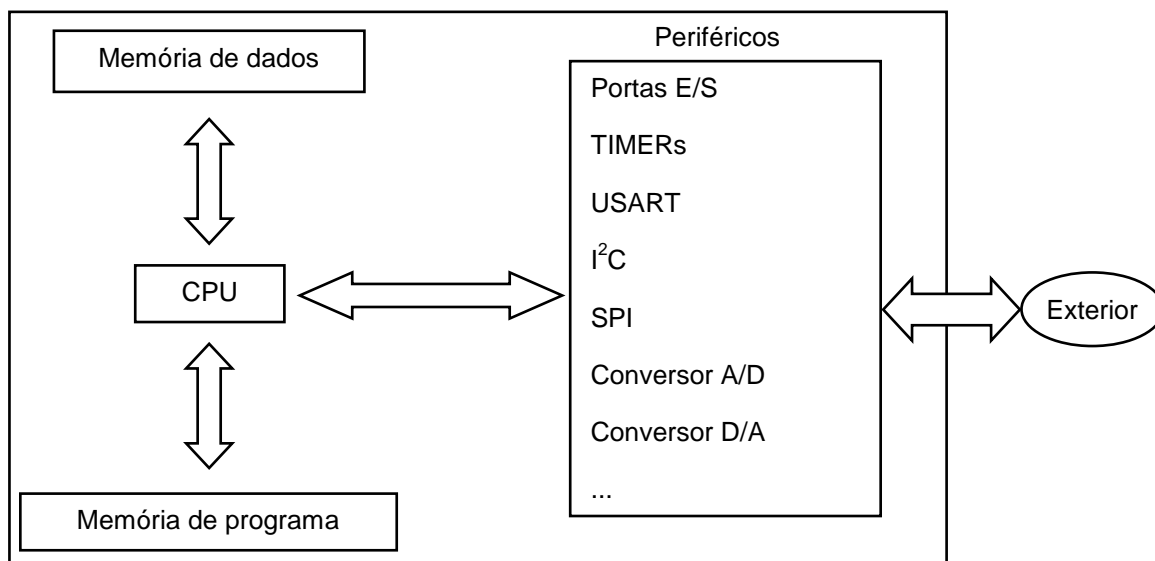


FIGURA 04 – DIAGRAMA RESUMIDO DE UM MICROCONTROLADOR.

FONTE: Miryadaira (2009).

Considerado como um tipo especializado de microcomputador, o microcontrolador é capaz de monitorar e controlar, em alta velocidade, as operações internas de uma máquina, de um equipamento ou de um processo, como por exemplo, em máquinas de autoatendimento, instrumentação médica, equipamentos digitais, robótica, controle de processo industrial (TOCCI e WIDMER, 2003).

A velocidade de processamento de um microcontrolador é controlada pela frequência de *clock*, sendo que quanto maior for sua frequência, maior será sua capacidade de processamento, bem como o consumo de energia.

Os pinos I/O (input/output) de um microcontrolador possibilitam que ele faça comunicação com o mundo exterior. Isto permite que a CPU envie informações que ativam e/ou desativam, por exemplo, um relé, uma lâmpada, um motor, como também possibilitam a aquisição de informações do meio, como temperatura, umidade, luminosidade (MIRYADAIRA, 2009).

Outra característica importante dos microcontroladores refere-se ao fato de possuírem memórias de armazenamento de dados e programas, sendo que, de acordo com Miryadaira (2009), as memórias aplicadas na maioria dos microcontroladores são não-voláteis do tipo FLASH-EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Only Memory*), podendo ser apagadas eletricamente e reprogramadas 100.000 a 1.000.000 de vezes.

2.6 CONVERSÃO A/D

Ao receber uma tensão elétrica de entrada, um conversor analógico-digital (ADC), após certo tempo, produz um código digital de saída que representa proporcionalmente a tensão de entrada.

A transformação analógico-digital (A/D) se dá por um sistema operacional que compara a tensão de entrada analógica com a tensão gerada no sistema (comparador), ou seja, muda de estado dependendo de qual entrada foi maior (Figura 05).

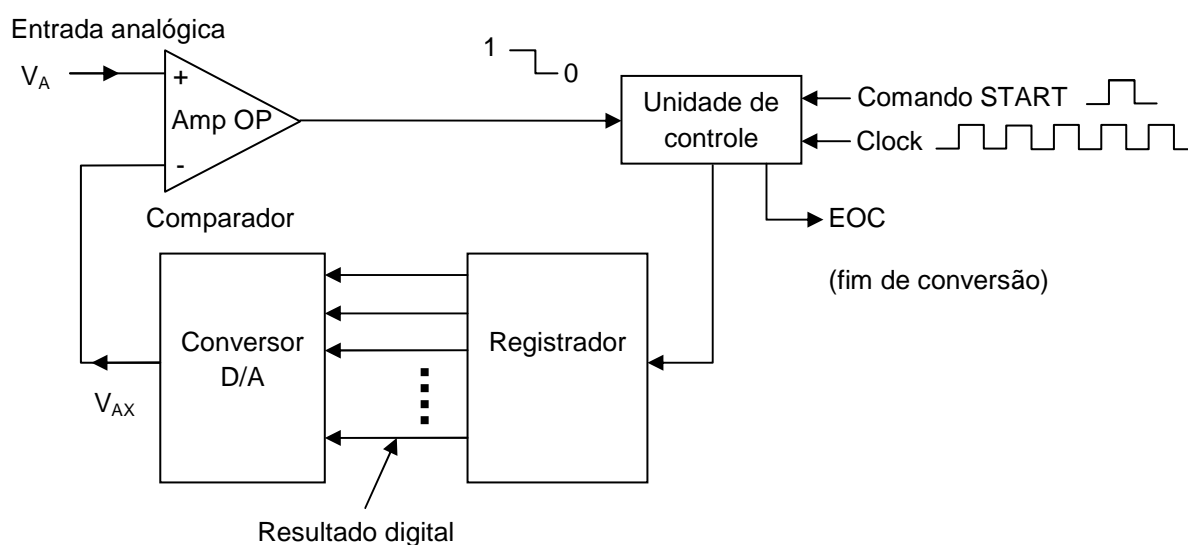


FIGURA 05 – DIAGRAMA GERAL DE UMA CLASSE DE ADC.

FONTE: Tocci e Widmer (2003).

O sistema de conversão A/D (Figura 05) compara a tensão analógica de entrada (V_A) com uma tensão de referência (V_{AX}) originária no conversor, sendo que, enquanto a tensão analógica de entrada for maior que a tensão de referência ($V_A > V_{AX}$) a saída do comparador permanece em nível alto, ou seja, igual a 1 (um), caso contrário, a saída do comparador passa para o seu nível baixo, valor igual a 0 (zero), gerando o valor digital correspondente à tensão de entrada analógica (TOCCI e WIDMER, 2003).

O valor digital gerado para representar a tensão de entrada poderá variar de 0 até a expressão $2^n - 1$ unidades, no qual n é o número de bits do ADC. Sendo

assim, o valor da tensão correspondente à variação de cada unidade pode ser obtido pela seguinte equação (Equação 01):

$$V_{1\text{bit}} = \frac{V_{\text{referência}}}{(2^n - 1)} \quad \text{Equação 01}$$

A Equação 01 mostra que quanto maior for o número de bits do conversor, menor será a porção de tensão necessária para gerar um nível digital, ou seja, menor será o tamanho do degrau da escada (Figura 06).

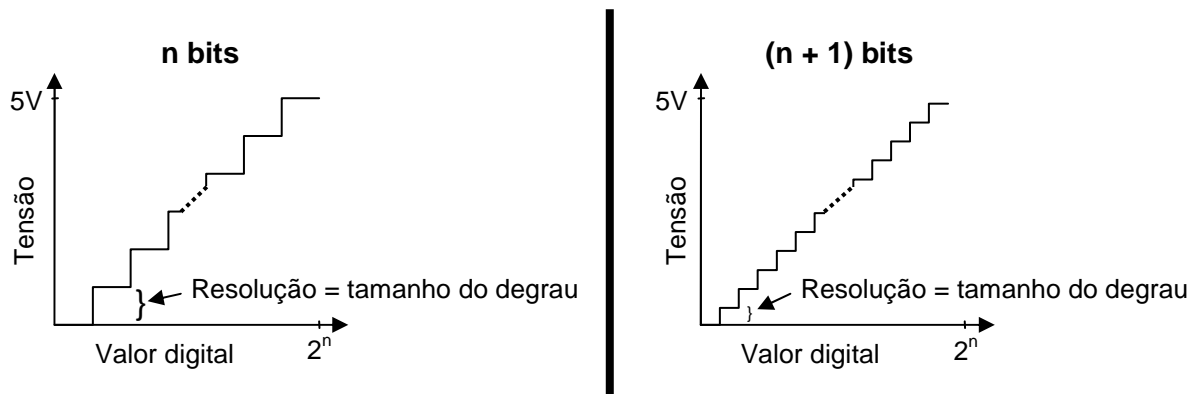


FIGURA 06 – FORMA DE ONDA EM ESCADA DE UM CONVERSOR A/D.

Na Figura 06, cada degrau representa a resolução do ADC, sendo que quanto menor o degrau, melhor é a resolução do ADC e melhor será a aproximação do valor de tensão de entrada analógica.

Para cada conversão A/D que o ADC executa, transcorre um intervalo de tempo que é denominado de tempo de aquisição e conversão do sinal. Durante esse período, basicamente são executadas as seguintes etapas (MIRYADAIRA, 2009):

1. O comando START inicia a operação, e mantém o capacitor C_{HOLD} conectado à entrada analógica.
2. Transcorrido o tempo de aquisição, o capacitor C_{HOLD} é desconectado da entrada analógica e inicia o processo de conversão A/D.
3. Ao término da conversão A/D o capacitor C_{HOLD} é conectado ao canal analógico sendo descarregado.

4. Reinicia o ciclo T_{AD} de conversão A/D.

A Figura 07 representa o tempo de aquisição e conversão de sinal e as operações realizadas durante o ciclo T_{AD} .

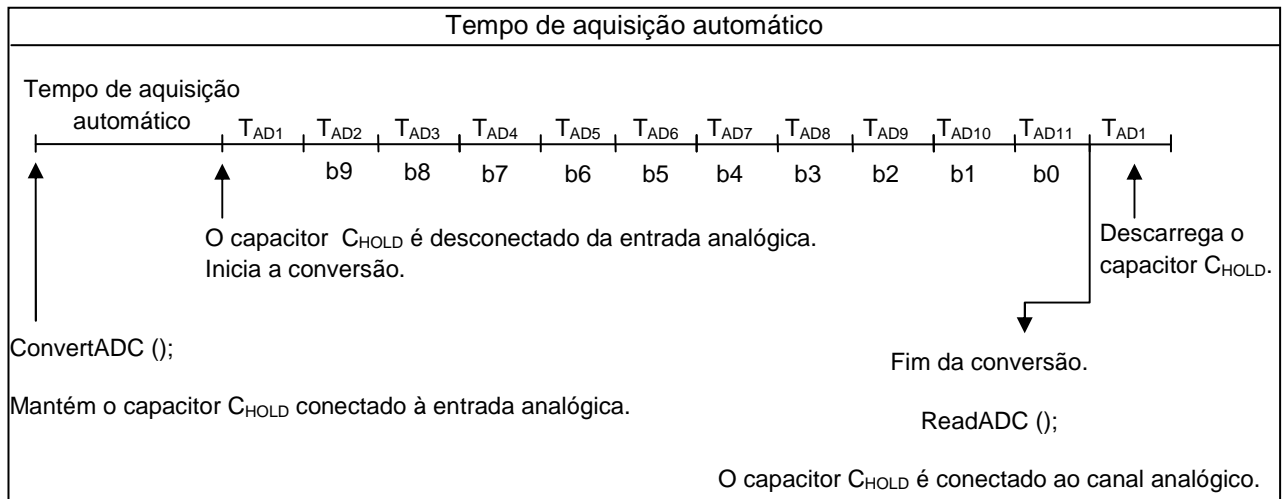


FIGURA 07 – CICLO T_{AD} DE CONVERSÃO A/D, COM TEMPO DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICO.

FONTE: Miryadaira (2009).

2.7 PWM (MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO)

O sistema PWM (*Pulse Width Modulation*) é uma técnica utilizada para controlar a tensão elétrica entregue a uma determinada carga, sendo essa tensão alterada ao modificar a largura de pulso do sinal, dentro de um período de tempo prefixado (MIRYADAIRA, 2009).

A modulação PWM é obtida ao se comparar uma tensão desejada de referência com um sinal triangular simétrico, sendo sua frequência definida como a frequência de chaveamento. A amplitude do pulso de saída do modulador muda de acordo com a amplitude de referência em relação com a portadora triangular, obtendo assim uma modulação por pulso, sendo este processo denominado Modulação por Largura de Pulso, ou, PWM (Figura 08) (LATHI, 1998).

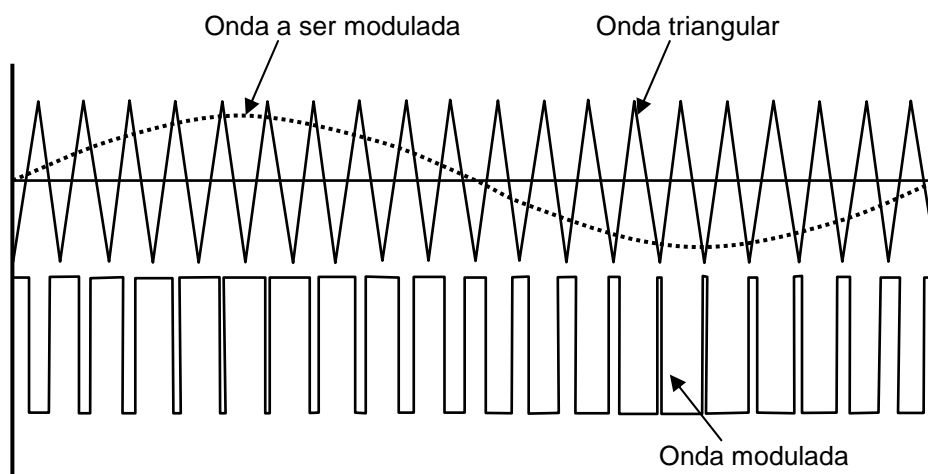


FIGURA 08 – ESQUEMA DA MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO - PWM.

FONTE: Adaptado de Lathi (1998).

2.8 REDE DE DIFRAÇÃO

As redes de difração por reflexão são constituídas sobre uma placa de vidro ou de metal com o auxílio de um diamante, com o qual confecciona ranhuras (sulcos) de mesma dimensão e paralelamente espaçadas entre si sobre a placa (JENKINS e WHITE, 1987).

Cada sulco funciona como fonte de luz difusa, sendo que, em uma rede de difração por reflexão, a luz difundida pelos vários elementos atinge qualquer ponto P com relação de fase bem definida.

A expressão:

$$a \sin \theta_m = m\lambda, \quad (\text{Equação 02})$$

também conhecida por equação das redes para incidência normal e a expressão:

$$a(\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m\lambda \quad (\text{Equação 03})$$

é utilizada em situações de incidência oblíqua, na qual: λ é o comprimento de onda de REM; m o número da ordem dos máximos; a a distância entre as fendas; θ_i ângulo de incidência; θ_m ângulo de difração para o máximo de ordem m . Tais

componentes definem a posição dos máximos de interferência, os quais correspondem a ângulos bem definidos (HECHT, 2002).

A posição dos máximos de interferência depende do λ , assim, ao variar o comprimento de onda, o θ_m para o máximo de ordem m será ligeiramente diferente do ângulo formado para o λ anterior, dando origem a um espectro contínuo.

O poder de resolução de uma rede de difração é dado pela seguinte expressão (Equação 04).

$$R = N \times m \quad (\text{Equação 04})$$

em que: R é o poder de resolução da rede de difração; N é o número de ranhuras; e m o número da ordem.

Pela Equação 04, constata-se que quanto menor for o espaçamento entre as ranhuras da rede (maior número de linhas), melhor é o poder de resolução da rede de difração.

De acordo com Klein e Furtak (1986), o poder de resolução para a ordem zero ($m = 0$) é zero, uma vez que não se faz a separação espectral dos comprimentos de onda que a constituem e, conseqüentemente, é inútil para espectroscopia.

Com o intuito de aproveitar a energia desperdiçada na ordem zero, as ranhuras são confeccionadas com um certo ângulo durante o corte, de forma a desviar parte da energia da ordem zero para uma ordem superior. Nas redes atuais, estas incisões são do tipo facetadas e o ângulo formado entre o plano da rede e da faceta, denominado ângulo *Blaze* é que determina a posição do máximo do padrão de difração (KLEIN e FURTAK, 1986). Sendo assim, a eficiência geral de uma rede de difração pode ser otimizada efetuando a seleção do ângulo *Blaze* que melhor atenda às características esperadas.

2.9 LENTE DELGADA PLANO-CONVEXA

Segundo Hecht (2002), a lente é um elemento que, por intermédio da refração introduz descontinuidade no meio em que a energia eletromagnética se propaga inicialmente e reconfigura a energia transmitida.

A forma em que a energia transmitida vai ser reconfigurada depende do tipo de lente empregada, podendo ela ser convergente e/ou divergente.

A lente convergente faz incidir um feixe de radiação eletromagnética em um ponto focal da lente. Já na divergente, o feixe de radiação eletromagnética diverge do ponto focal imagem.

Para a lente convergente delgada plano-convexa, a distância focal é dada pela seguinte equação (Equação 05):

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Equação 05})$$

Em que: f (distância focal), n (índice de refração do material da lente), r_1 e r_2 (raios de curvatura das duas superfícies da lente).

2.10 ABERRAÇÕES MONOCROMÁTICAS

As aberrações são interferências resultantes da interação do fluxo de REM com a lente. Elas podem ser divididas em policromática e monocromática.

Dentre as aberrações monocromáticas há: a aberração esférica, coma e o astigmatismo. Elas reduzem o contraste da imagem, degradam os seus detalhes e deformam a imagem.

A aberração esférica consiste na variação da distância focal com a abertura para raios não-paraxiais, reduz o contraste e provoca degradação dos detalhes da imagem. Ela varia com a distância do objeto e com a forma da lente para uma abertura e distância focal fixa (KLEIN e FURTAK, 1986).

O coma resulta do fato de os planos principais serem realmente planos na região paraxial somente, fazendo com que a distância focal efetiva varie e cause a degradação da imagem, dependendo do tipo da lente.

Quando um dado objeto está afastado significativamente do eixo, o cone de raios incidentes na lente providos do ponto objeto interceptam a linha-imagem primária. Após atingirem a linha-imagem primária, a seção do feixe alarga-se rapidamente e atinge novamente a forma circular, toma a forma de uma linha de

distribuição complexa de regiões brilhantes e escuras, sendo este efeito denominado astigmatismo.

Os efeitos das aberrações monocromáticas em um sistema óptico podem ser minimizados. Para tanto é necessário definir criteriosamente os parâmetros físicos do sistema, a forma, o tipo de material, a espessura, a separação entre lentes e a localização do diafragma (HECHT, 2002).

2.11 SENSOR CCD (**C**harge **C**oupled **D**evice) E CMOS (**C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor)

Em 1970 Boyle e Smith desenvolveram um dispositivo capaz de armazenar e transferir cargas elétricas introduzidas eletronicamente ou opticamente denominado “dispositivo semicondutor de carga acoplada - CCSD” (em inglês: *Charge Coupled Semiconductor Devices*), o atual CCD (em inglês: *Charge Coupled Device*). O primeiro CCD obtido se deu pela associação linear de capacitores MOS (em inglês: *Metal Oxide Semiconductor*) de efeito de campo, denominado CCD linear. Pela junção paralela de CCD linear (Figura 09d), surgiu o CCD de quadro (Figura 09e) (BOYLE e SMITH, 1970; TURNER, 1997; SZE e NG, 2007).

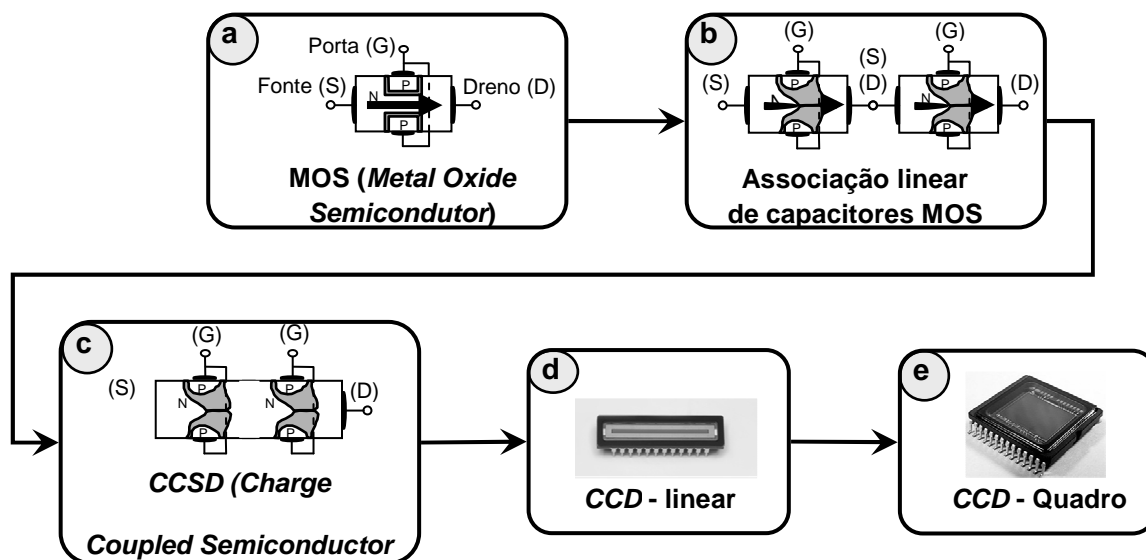


FIGURA 09 – OBTENÇÃO DO CCD PELA ASSOCIAÇÃO LINEAR DE CAPACITORES MOS.

FONTE: Adaptado de CASSIGNOL (1967).

Um capacitor MOS de efeito de campo (Figura 09a) dispõe de uma fonte, uma porta e um dreno. Dada a estrutura do CCD, o dreno de cada capacitor MOS é ocupado pela fonte do próximo capacitor (Figura 09), havendo somente um dreno no final de cada linha (Figura 09c).

A fonte funciona como poço de potencial elétrico (fotocélulas/pixels) capaz de absorver fótons da luz incidente e armazená-los na forma de carga elétrica (BARBE, 1975; SZE e NG, 2007). A porta tem como função controlar a transferência de carga entre os n poços de potencial (n canais e/ou n pixels). O controle da transferência de carga se dá pela aplicação de pulsos elétricos na porta, os quais são controlados por um *clock waveform*, ocasionando a formação de uma camada de depleção que se estende para dentro do canal, obstruindo a passagem da corrente elétrica, conforme apresentado na Figura 10 (KOSONOCKY, 1974; KOSONOCKY e SAUER, 1975; BEYNON e LAMB, 1980; SZE e NG, 2007).

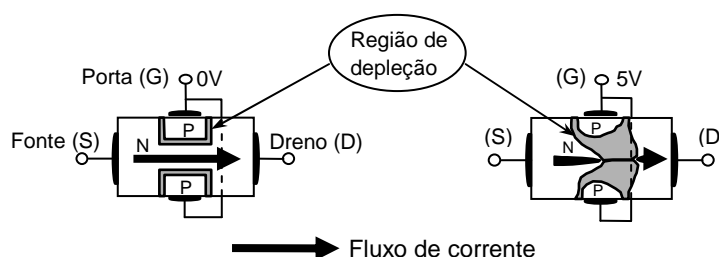


FIGURA 10 – OBTENÇÃO DO CCD PELA ASSOCIAÇÃO LINEAR DE CAPACITORES MOS.

FONTE: Adaptado de CASSIGNOL (1967).

O sensor CMOS surgiu em seguida, mantendo o mesmo princípio físico do CCD para efetuar a conversão da energia eletromagnética em um valor passível de se converter em informação. No entanto, a diferença entre o sensor CMOS e o sensor CCD está relacionada à sua arquitetura, principalmente na forma de coletar as informações geradas no mesmo (TAYLOR, 1998 e WALSH, 1986).

2.12 PRINCIPAIS RUÍDOS DE UM DETECTOR DO TIPO CCD E/OU CMOS

Os principais ruídos de um detector do tipo CCD e/ou CMOS são originários de efeitos sistemáticos ou de efeito transiente causados por falhas na fabricação do detector ou deficiência na tecnologia do dispositivo, sendo a corrente escura e o

“*blemishes*” as fontes de ruído de maior relevância (SHORTIS e BEYER, 1996; SZE e NG, 2007).

A corrente escura origina-se da agitação térmica dos portadores minoritários, que, no caso do silício, são os elétrons presentes no semiconductor (BEYNON e LAMB, 1980; SZE e NG, 2007; SHORTIS e BEYER, 1996). Sua presença está fortemente correlacionada com a temperatura a qual exerce influência sobre o fenômeno físico responsável pela condutividade elétrica nos materiais semicondutores, que é produzida continuamente em taxas proporcionais à temperatura absoluta do dispositivo, tendo uma variação exponencialmente dependente da temperatura e diminuindo por um fator de aproximadamente 2 (dois) para cada redução de 10 °C na temperatura do dispositivo (BEYNON e LAMB, 1980; SZE e NG, 2007).

A geração de corrente escura tende a ser não-uniforme sobre todo o dispositivo, havendo pontos ou áreas fixas com taxa de geração de corrente escura diferenciada dos demais elementos, sendo este efeito denominado *blemishes* (BEYNON e LAMB, 1980; SHORTIS e BEYER, 1996).

2.13 FILTRO DE BAYER

Nas câmeras digitais, a formação da cor é realizada com o auxílio de um arranjo de filtros passa banda dispostos sobre o sensor, denominado Filtro de Bayer (Figura 11) (BOCKAERT, 2008).

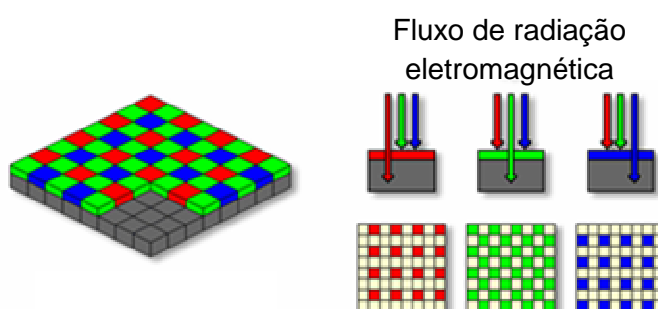


FIGURA 11 – FILTRO DE BAYER.

FONTE: Bockaert (2008).

O Filtro de Bayer é composto por um filtro azul (25%), dois filtros verdes (50%) e um filtro vermelho (25%).

Ao final da exposição são obtidas três imagens: uma armazenando os valores representam a faixa do espectro eletromagnético referente à faixa do azul, uma referente ao verde e uma referente ao vermelho. A combinação destas imagens resulta a imagem colorida.

A seguir serão apresentados o material e o método utilizados no para o desenvolvimento desta tese.

3 MATERIAL E MÉTODO

Para desenvolver o protótipo do espectrorradiômetro foram empregados os seguintes componentes eletrônicos:

- 10 - LEDs 5 mm;
- 16 - Resistores;
- 6 - Capacitores;
- 2 - Diodos 1N4007;
- 4 - Terminais PCI;
- 4 - Terminais PCF;
- 1 - CI – L7805;
- 2 - CI – IRFZ44;
- 1 - Chave Tátil;
- 1 - Cristal 20MHz;
- 1 - Termistor;
- 1 - PIC18F4550;
- 1 - Placa de Circuito Impresso;
- 2 - Pastilhas termoelétricas;
- 2 - WebCams;
- 1 - Lente biconvexa;
- 1 - Lente Plano Convexa;
- 1 - Espelho semi-transparente;
- 1 - Rede de difração.

3.1 PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO

O protótipo de espectrorradiômetro desenvolvido é capaz de realizar as funções descritas no fluxograma apresentado na Figura 12.

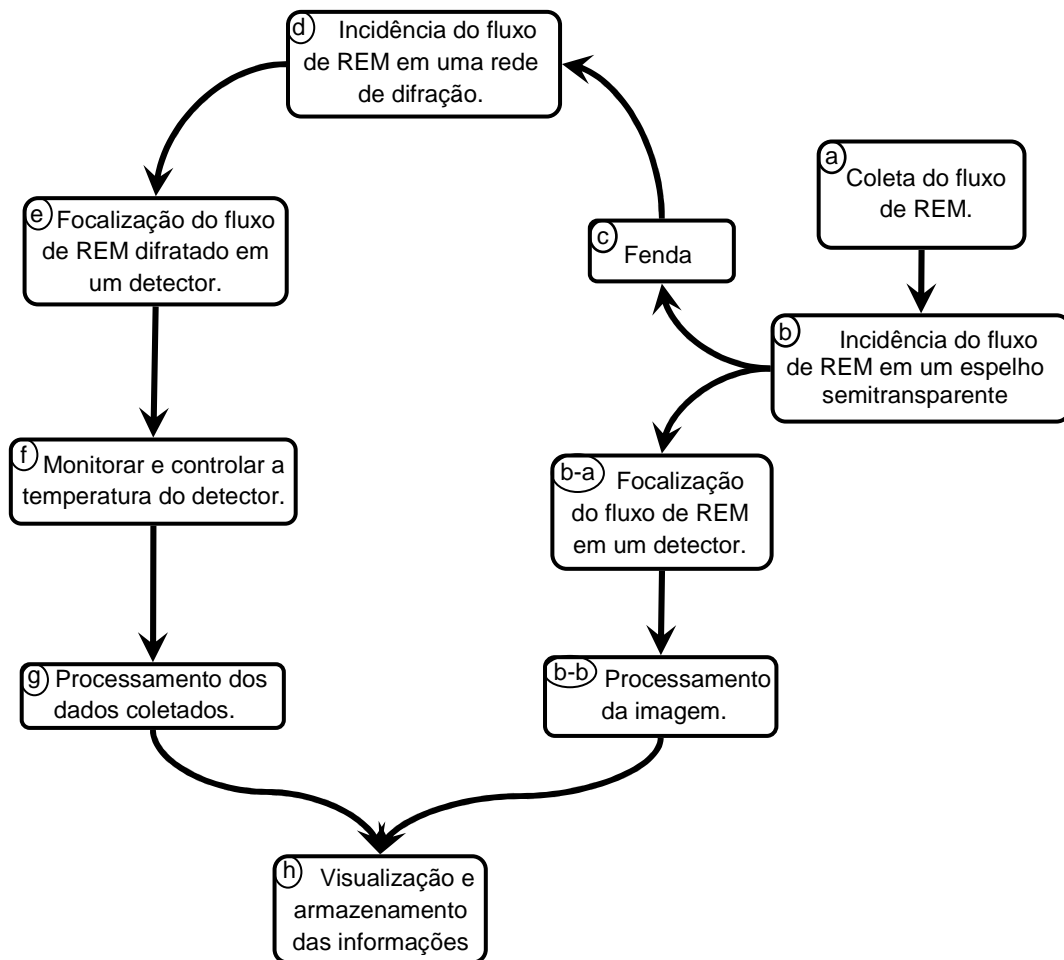


FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO ESPECTRORRADIÔMETRO PROPOSTO.

Conforme apresentado na Figura 12, o fluxo de REM coletado (a) é incidido em um espelho semitransparente (b) o qual reflete uma parte do fluxo (Parte 1) e transmite a outra (Parte 2).

A parte do fluxo de radiação refletido pelo espelho semitransparente (Parte 1) é coletada por uma lente (b-a), que a focaliza sobre um detector (b-b) gerando assim a imagem do objeto observado. Gerada a imagem, o sistema permite ao usuário visualizar as mesmas e optar por salvar ou não as informações coletadas.

A parte transmitida pelo espelho (Parte 2) é focalizada em uma fenda (c) e, em seguida, em uma rede de difração (d) onde ocorre a separação dos comprimentos de onda, que incidem sobre o detector (e), o qual é refrigerado. Sua temperatura é monitorada constantemente (f), gerando uma tensão elétrica no mesmo. A tensão elétrica gerada no detector é processada (g) e os valores gerados

são disponibilizados para visualização, podendo o usuário optar por armazenar ou não as informações obtidas (*h*).

Na Figura 13 é apresentada, em três partes, uma visão geral e alguns detalhes da arquitetura proposta para a confecção do protótipo. Na parte I, há a visão global do equipamento, Na parte II, registra-se a vista superior do equipamento e, na parte III, é apresentada a vista lateral.

Na parte I há: (a) Protótipo do espectrorradiômetro proposto, (b) Unidade de processamento e armazenamento de dados, (c) Unidade de visualização dos dados. A subdivisão (a) é composta de: uma lente para coleta de radiação eletromagnética (1), uma estrutura de acondicionamento dos dispositivos ópticos do sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura do detector (2), dois cabos USB para conectar os detectores à unidade de processamento de dados (3), duas fontes de alimentação (4a). Na subdivisão (b) referente à unidade de processamento e armazenamento de dados está a fonte de alimentação (4b). Na parte II há: a vista superior da parte interna da estrutura de acondicionamento dos dispositivos ópticos e do sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura do detector (1); o fluxo de radiação eletromagnética (2); a lente para coleta de radiação eletromagnética (3); a fenda simples (4); a rede de difração (5); a lente para focalizar a radiação eletromagnética difratada no detector (6); o detector (7); o sistema de refrigeração do detector (8); o espelho semitransparente (9); a câmara para registrar a imagem do objeto observado (10); o hardware de controle do sistema de refrigeração (11). Na parte III, encontram-se: a) vista lateral: estrutura de acondicionamento dos dispositivos ópticos e do sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura do detector (1); lente para coleta de radiação eletromagnética (2); rede de difração (3); lente para focalização da radiação eletromagnética difratada no detector (4); detector (5); sistema de refrigeração do detector (6); hardware do sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura do detector (7); cabo de alimentação de 9 V (8); cabo de alimentação de 19 V (9); cabo USB para conectar os detectores à unidade de processamento de dados (10).

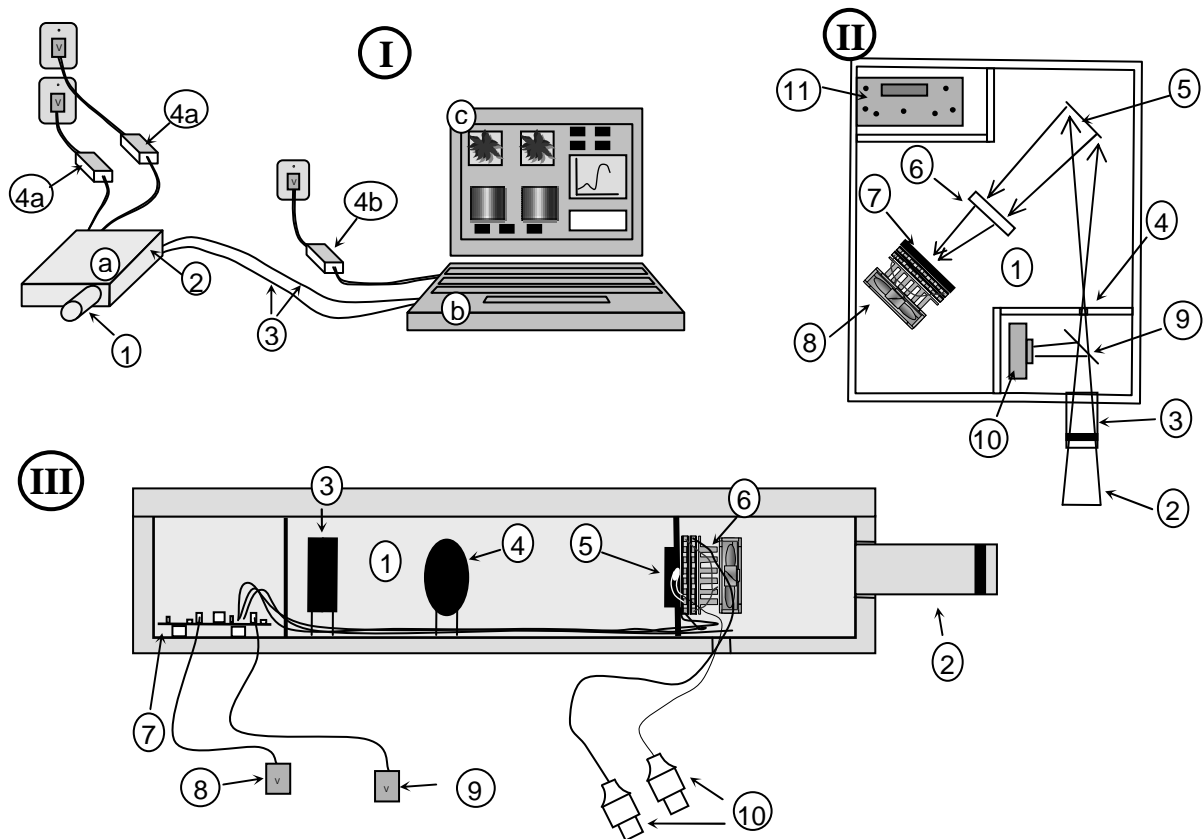


FIGURA 13 – VISTA DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA A MONTAGEM DO PROTÓTIPO.

A necessidade de habilidades multidisciplinares levou ao desenvolvimento do projeto seguindo as seguintes etapas:

- 1) Desenvolvimento do sistema automatizado para refrigerar e monitorar a temperatura do detector utilizado.
- 2) Definição e montagem do sistema óptico.
- 3) Montagem do protótipo.
- 4) Desenvolvimento de um aplicativo para processamento e visualização dos dados a serem obtidos.
- 5) Avaliação dos dados obtidos.

Mediante ao exposto, a seguir são apresentadas as etapas de desenvolvimento do trabalho.

3.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO DETECTOR E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

3.2.1 Constituição do Sistema de Monitoramento da Temperatura

Para medir e monitorar a temperatura do detector, foi adquirido um sensor termistor de 200 k Ω para temperatura ambiente, cuja operação se dá entre -10 °C a 60 °C. O termistor apresenta forma circular e tamanho de \approx 3 mm (Figura 14).



FIGURA 14 – TERMISTOR 200 K Ω PARA TEMPERATURA AMBIENTE.

As vantagens em utilizar termistores para medida de temperatura foi o baixo custo e a fácil aquisição no mercado nacional, além da alta resolução (décimos de °C) e a flexibilidade devido ao seu tamanho e à sua forma.

O termistor é um dispositivo, cuja resistência elétrica varia monotonicamente com a variação da temperatura. Para definir a relação resistência elétrica x temperatura, é necessário efetuar a calibração do termistor.

Neste trabalho utilizou-se um banho térmico PolyScience Modelo 9112 como referência para calibrar o termistor (Figura 15). O PolyScience (Figura 15a) é um equipamento capaz de manter a temperatura do seu fluido interno dentro de uma faixa de temperatura de -20 °C a 200 °C com estabilidade de \pm 0,01 °C.

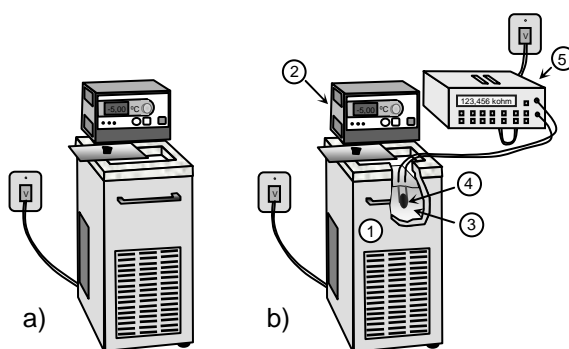


FIGURA 15 – A) BANHO TÉRMICO POLYSCIENCE MODELO 9112; E B) PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR.

Para calibrar o termistor (Figura 15b), ele foi mergulhado no banho térmico do equipamento PolyScience, contendo uma mistura de 50 % de água destilada e 50% de etileno glicol. O etileno glicol é uma substância miscível com a água e, devido às suas propriedades químicas e físicas, desloca o ponto de solidificação da água para uma temperatura em torno de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, permitindo que esta solução seja utilizada como banho térmico para temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem que ocorra sua solidificação e/ou evaporação (Manual do PolyScience). Os termistores, a serem calibrados, foram mergulhados neste banho térmico, e sua resistência elétrica medida em intervalos de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na faixa compreendida entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Utilizou-se um multímetro configurado para leitura da resistência elétrica (ohmímetro) conforme apresentado na Figura 15b, na qual existem: a cuba de armazenamento do banho térmico (1); o controlador digital da temperatura (2); o banho térmico (3); o termistor a ser calibrado (4) e o multímetro (Neste trabalho foi usado o multímetro Keithley Modelo 2000) (5).

3.2.2 Sistema de Refrigeração

A refrigeração do detector foi realizada pela utilização de pastilha termoelétrica, (Figura 03). A absorção ou a produção de calor em uma junta são indicações de que há atuação de uma força eletromotriz na junção, sendo sua intensidade proporcional à corrente elétrica e ao número de pares de elementos tipo n e tipo p. (CRECRAFT et al. 1993).

Cada material termoelétrico reage de maneira diferente, havendo um ponto em que o calor gerado internamente anula a capacidade do módulo em transferir calor. Dessa forma, cada pastilha possui seu próprio limite de quanto calor pode transferir sendo este valor denominado Q_{\max} . Neste trabalho, a quantidade de calor transferido (Q_{\max}) foi representada pela temperatura da pastilha. A intensidade de corrente elétrica associada ao Q_{\max} é conhecida como I_{\max} . Ao atingir a corrente I_{\max} , haverá uma diferença máxima de temperatura entre o lado frio e o lado quente, designado ΔT_{\max} (SMYDER e URSELL, 2003).

A diferença de temperatura ΔT_{\max} pode ser aumentada utilizando-se dissipador térmico e ventilador em conjunto com uma ou mais pastilhas termoeletricas.

Neste trabalho foi feita a associação de pastilhas termoeletricas com um dissipador térmico e um ventilador perfazendo as configurações sugeridas na Figura 16 para refrigerar o detector.

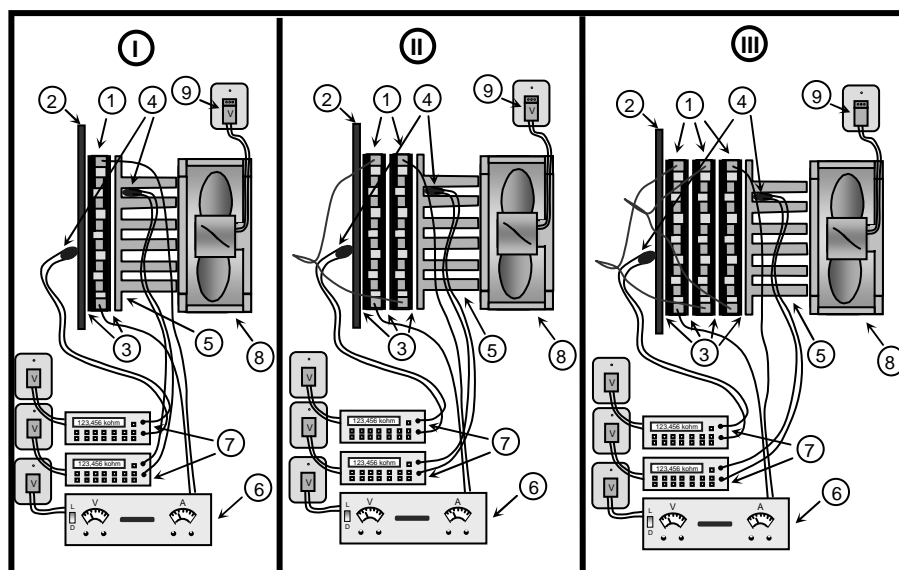


FIGURA 16 – CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA MONTAGEM INICIAL DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO DETECTOR.

Na Figura 16 estão as configurações de montagem do sistema de refrigeração composto pela disposição das pastilhas termoeletricas, com apenas uma pastilha termoeletrica (I), com duas pastilhas termoeletricas (II) e com três pastilhas termoeletricas (III). Nos esquemas dos sistemas das configurações, as representações constituem-se de pastilhas termoeletricas (1), placa de circuito impresso (2), as junções entre a placa de circuito impresso com a pastilha termoeletrica, entre as pastilhas termoeletricas e da pastilha termoeletrica com o dissipador térmico (3); termistor (4); dissipador térmico (5); fonte estabilizadora de corrente elétrica (6); multímetro (7); ventilador (8) e a fonte de tensão elétrica regulável de 3 a 12 Volts (9).

Para se obter o valor de Q_{\max} , I_{\max} e ΔT_{\max} dos sistemas de refrigeração foram realizadas medidas em laboratório. Foi usada a fonte estabilizadora TECTROL

Modelo TCA 60-10 para se controlar a corrente elétrica na pastilha termoeletrica e do multímetro Keithley Modelo 2000 para se medir a resistência elétrica do termistor (temperatura).

Para montar as configurações do sistema de refrigeração a ser utilizado no espectrorradiômetro, foram adquiridas pastilhas termoeletricas de 91,2 W (P91) e duas de 136,8 W (P137 – 1 e 2) de consumo de corrente elétrica (amperagem) máxima de 9 A, sendo a dimensão de todas as pastilhas iguais a 40,0 mm x 40,0 mm x 3,4 mm.

As configurações do sistema de resfriamento foram montadas como descritas na Figura 16. Para assegurar uma transferência térmica eficiente entre os constituintes, usou-se uma pasta térmica, cujo composto químico é elaborado com elementos com propriedades de alta condução térmica.

As medidas das temperaturas foram realizadas seguindo o seguinte critério:

- 1) Ventilador e pastilha termoeletrica foram desligados (temperatura ambiente).
- 2) Aplicou-se uma tensão elétrica de 5 V ao ventilador e uma corrente elétrica de 200 mA na pastilha termoeletrica.
- 3) Após efetuar a leitura da temperatura, manteve-se a tensão elétrica aplicada ao ventilador e se aplicou mais 200 mA na pastilha termoeletrica.

O passo 3 foi repetido até que a eficiência de resfriamento do conjunto medido atingisse seu limite.

Cabe ressaltar que, após aplicar uma corrente elétrica na pastilha termoeletrica, ocorreu o resfriamento de um lado e aquecimento do outro lado da placa até se chegar a um ponto de estabilidade. Foi efetuada a leitura da resistência elétrica do termistor do lado quente e do lado frio. Os valores foram plotados em um gráfico, no qual a abscissa representa a corrente elétrica aplicada na pastilha termoeletrica e ordenada a temperatura de ambos os lados da pastilha termoeletrica.

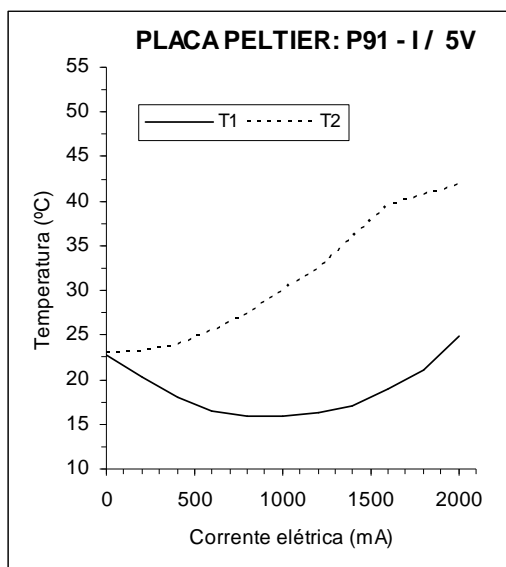


FIGURA 17 – RELAÇÃO TEMPERATURA X CORRENTE ELÉTRICA EM UMA PASTILHA TERMOELÉTRICA. SENDO T1 A TEMPERATURA DO LADO FRIO E T2 A TEMPERATURA DO LADO QUENTE.

A Figura 17 mostra que, à medida que a corrente elétrica aplicada na pastilha (ou conjunto de pastilhas) aumenta, o aumento de temperatura no lado quente começa a influenciar a temperatura da face fria (condução térmica), fazendo com que a eficiência do dispositivo diminua. As curvas para as outras duas configurações são similares. Assim é possível determinar o valor máximo de corrente a ser aplicada na pastilha sem que esse efeito de condução térmica paralela comece a influenciar a performance do dispositivo.

3.2.3 Automação do Sistema de Refrigeração e Monitoramento da Temperatura

O controle simultâneo da corrente elétrica aplicada à pastilha termoeletrica e da tensão elétrica fornecida ao ventilador (controlando sua rotação) seria uma tarefa tediosa para se regular manualmente num possível instrumento de campo. Daí a necessidade de se desenvolver um controle automático para se obter uma desejada temperatura e mantê-la estável durante todo o processo de utilização do equipamento. O sistema final de automatização projetado para esta finalidade efetua as operações apresentadas na Figura 18.

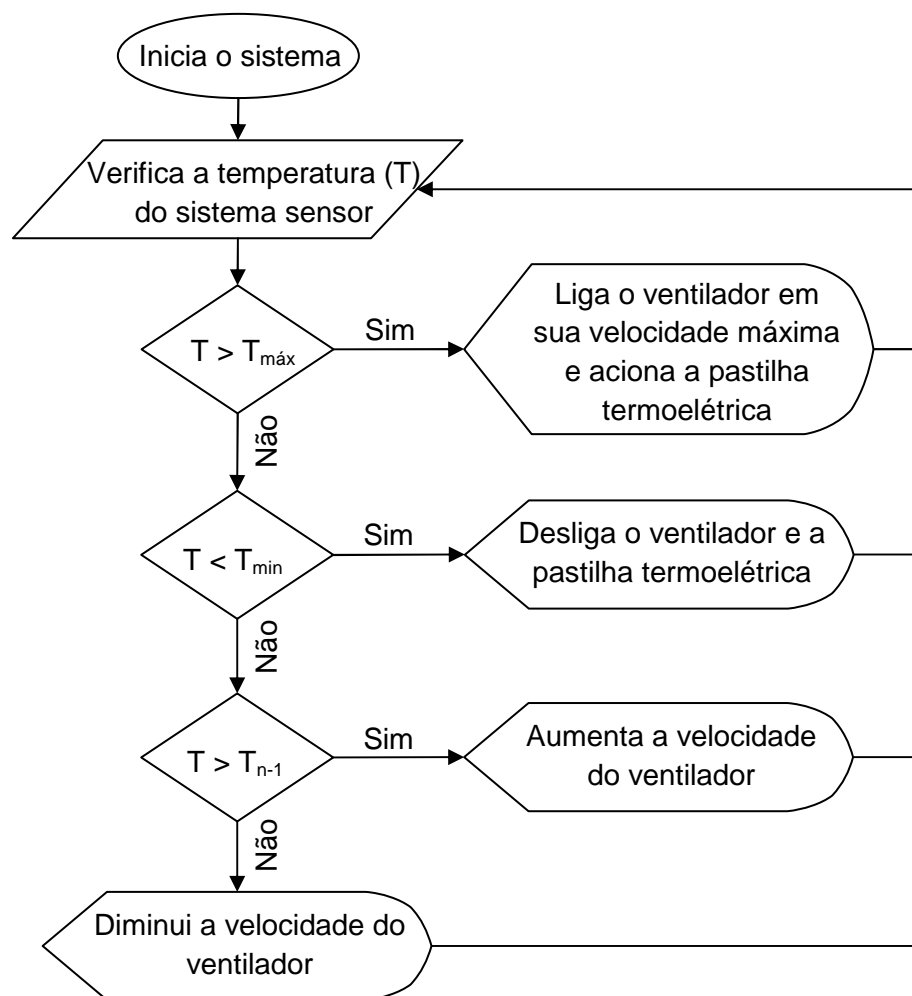


FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA, SENDO: $T \Rightarrow$ TEMPERATURA ATUAL DO SISTEMA; $T_{\text{MÁX}} \Rightarrow$ TEMPERATURA MÁXIMA PERMITIDA; $T_{\text{MIN}} \Rightarrow$ TEMPERATURA MÍNIMA PERMITIDA; $T_{n-1} \Rightarrow$ TEMPERATURA ANTERIOR.

Para que o hardware fosse capaz de executar as operações foi necessário o uso de um microcontrolador. O microcontrolador utilizado foi o PIC18F4550 (Figura 19), o qual possui portas de entrada de sinal analógico, conversor A/D, portas para enviar comandos a periféricos, sistema PWM para controlar a quantidade de carga entregue a um periférico, entre outras funções.

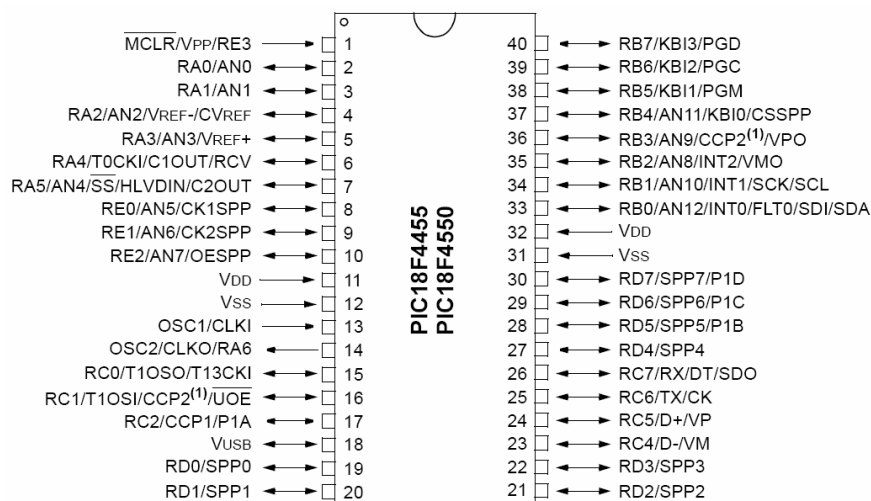


FIGURA 19 – PINAGEM DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.

FONTE: Microchip (2009).

Os esquemas elétricos a serem adaptados ao microcontrolador PIC18F4550 necessários para realizar as funções desejadas são descritos a seguir.

3.2.3.1 Sinal de *clock*

Para que o microcontrolador possa executar suas operações foi necessário o emprego de uma fonte de *clock*.

A fonte de *clock* é a responsável pela velocidade de processamento dos dados. Quanto maior for sua frequência, maior será a velocidade de processamento do microcontrolador.

Os pinos 13 (OSC1) e 14 (OSC2) do microcontrolador PIC18F4550 são as portas de entradas de sinal de *clock*, suportando diversos tipos de osciladores externos como, por exemplo, cristal de 4, 8 e 20 MHz os quais são capazes de oferecer sinais precisos de *clock*. No entanto, para um adequado funcionamento do cristal foi preciso empregar um par de capacitores adequados ao cristal utilizado.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados um cristal de frequência de 20 MHz, dois capacitores de 15 pF / 25 V, sendo o último recomendado pelo fabricante (MICROCHIP, 2009).

A Figura 20 apresenta o esquema elétrico para a montagem do cristal de sinal de *clock* no microcontrolador PIC18F4550.

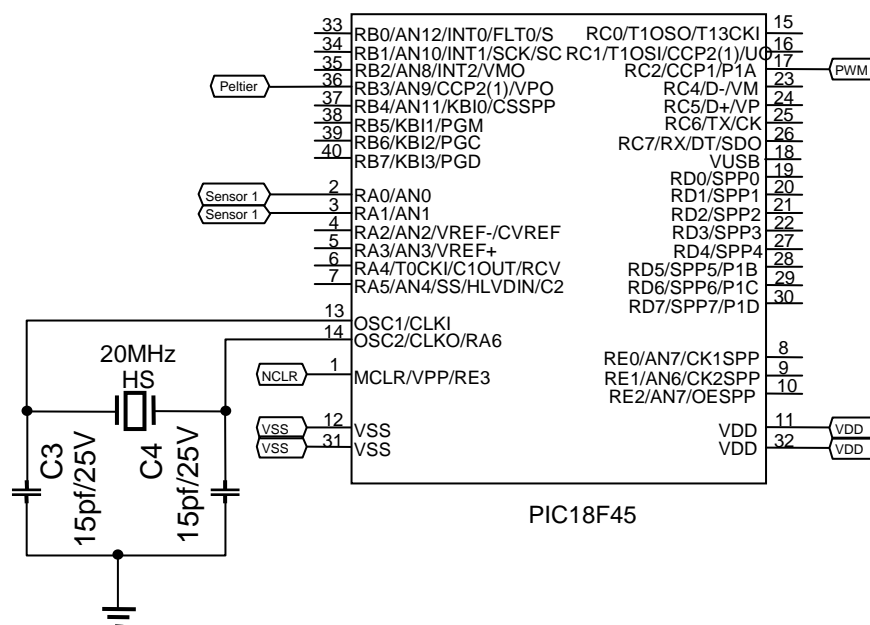


FIGURA 20 – ESQUEMA ELÉTRICO DA MONTAGEM DO OSCILADOR PRIMÁRIO DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.

FONTE: Adaptado de Microchip (2009).

3.2.3.2 Fonte de alimentação do PIC18F4550

As fontes de tensão disponíveis no laboratório são do tipo corrente alternada de 110 V e 220 V. A maior parte dos equipamentos digitais utilizam fontes de tensão do tipo corrente contínua variando de poucos milivolts a dezenas de volts.

O fornecimento de energia elétrica para alimentar equipamentos que utilizam tensão do tipo corrente contínua com as fontes de tensão disponíveis em laboratório, necessita empregar um circuito mais elaborado, dotado de transformador e retificador de tensão, capaz de transformar a tensão de corrente alternada de 110 V e/ou 220 V em uma tensão de corrente contínua livre de ruídos (*ripples*), para garantir um bom funcionamento dos equipamentos como é o caso dos microcontroladores (MIYADAIRA, 2009).

No entanto, por si só, um transformador e um retificador não são capazes de fornecer uma tensão contínua e livre de ruídos, logo foi preciso filtrar e regular a tensão fornecida pelo transformador e retificador. Esta filtragem da tensão fornecida pelo transformador e retificador foi realizada empregando-se capacitores na saída do retificador. Nesse caso, o capacitor recebe uma tensão retificada de onda-completa

e entrega uma onda com um nível de tensão V_{cc} e uma tensão de *ripple* V , resultante do processo de carga e descarga do capacitor (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1998).

A regulagem da tensão foi realizada utilizando-se um circuito integrado (CI) regulador de tensão, o qual contém fonte de referência, amplificador comparador, dispositivo de controle e proteção contra sobrecarga em um único encapsulamento sendo capaz de receber uma tensão cc variável e entregar um nível ligeiramente menor, invariável (constante) mesmo que a tensão de entrada varie, ou a carga conectada mude de valor.

Nesse sentido, para garantir o bom funcionamento do microcontrolador PIC18F4550 empregado, foi montado o circuito apresentado na Figura 21, o qual emprega dois capacitores, sendo um de 100 nF / 25 V e o outro de 47 μ F / 25V e um regulador de tensão LM7805 que fornece uma tensão de saída igual a + 5 V.

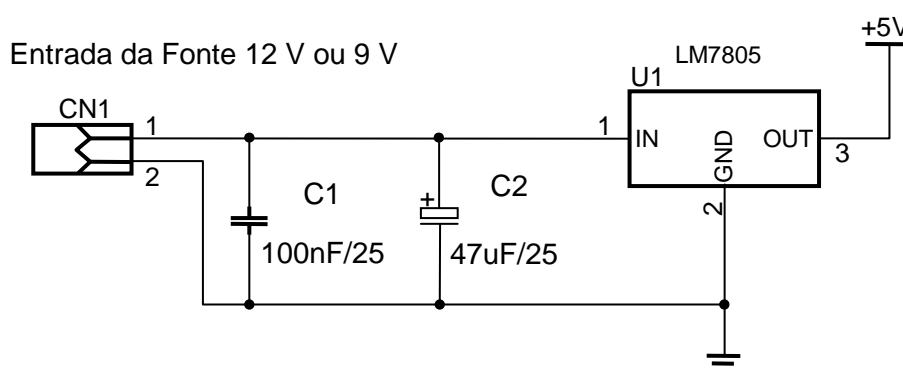


FIGURA 21 – ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA DE FILTRAGEM E REGULAGEM DA TENSÃO DE ENTRADA NO HARDWARE DE AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO SISTEMA SENSOR.

FONTE: Adaptado de Lathi (1998) e Boylestad e Nashelsky (1998).

A tensão fornecida ao hardware proposto foi filtrada e regulada. Para que houvesse maior segurança quanto à eliminação de ruídos indesejáveis ao sistema, foram utilizados capacitores de desacoplamento de capacitância equivalente a 100 nF / 25 V, conforme recomendado por Miyadaira (2009). Estes capacitores foram dispostos o mais próximo possível dos pinos 11 (V_{DD}) e 32 (V_{DD}) os quais são as entradas de alimentação positiva do microcontrolador PIC18F4550. O esquema elétrico para a montagem do circuito é apresentado na Figura 22.

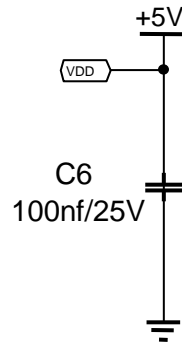


FIGURA 22 – ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO +5V DO PIC18F4550.

FONTE: Adaptado de Miyadaira (2009).

Os pinos 12 (V_{SS}) e 31 (V_{SS}) são as entradas do terra do microcontrolador PIC18F4550, podendo ser ligados diretamente ao terra do hardware, conforme proposto na Figura 23.

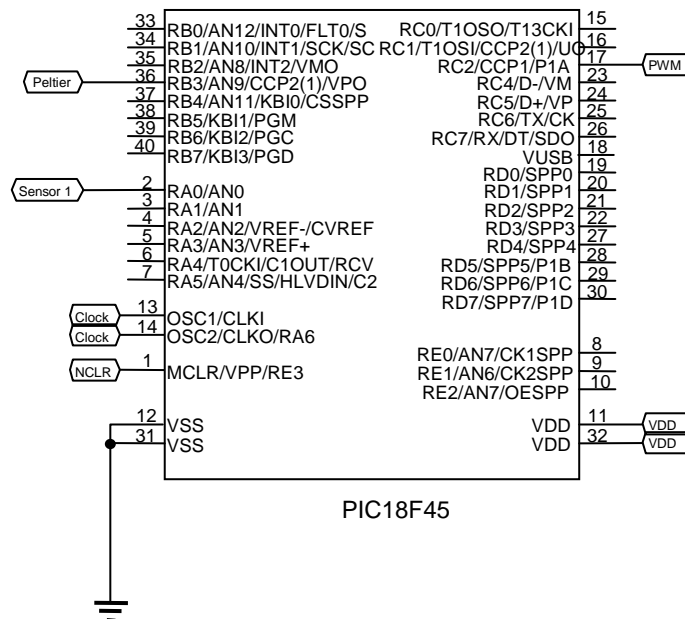


FIGURA 23 – ESQUEMA ELÉTRICO DA MONTAGEM DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO TERRA DO PIC18F4550.

FONTE: Adaptado de Microchip (2009).

3.2.3.3 Circuito de *reset* para o microcontrolador PIC18F4550

O pino 1 do microcontrolador PIC18F4550 (Figura19), denominado em seu data sheet como \overline{MCLR} (*Master Clear Reset*), é a única entrada externa que permite ocasionar o *reset* do mesmo (MICROCHIP, 2009), ou seja, o \overline{MCLR} ao ser

submetido a uma tensão inferior a 1 V força o microcontrolador a reiniciar o dispositivo.

O esquema elétrico apresentado na Figura 24 foi proposto para o desenvolvimento do hardware com a finalidade de enviar, quando necessário, comando de *reset* ao microcontrolador.



FIGURA 24 – ESQUEMA ELÉTRICO PARA APLICAR OPERAÇÃO DE RESET NO PINO $\overline{\text{MCLR}}$ DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.

FONTE: Adaptado de Microchip (2009).

3.2.3.4 Esquema do circuito eletrônico para o sistema de monitoramento de temperatura

O microcontrolador PIC18F4550 possui 13 canais multiplexados capazes de efetuar a conversão A/D (Analógica/Digital) de um sinal analógico em torno de 15 μs , com uma resolução de 10 bits, sendo sua tensão de referência configurável (MIYADAIRA, 2009).

Para conectar o termistor ao microcontrolador foi preciso ligá-lo à fonte de tensão e a um terra conforme o esquema apresentado na Figura 25.

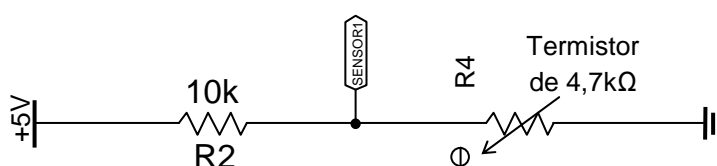


FIGURA 25 – ESQUEMA DO CIRCUITO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA.

FONTE: Adaptado de Microchip (2009).

O circuito mostrado na Figura 25 apresenta as mesmas características de um circuito regulador de tensão empregando um potenciômetro, sendo que, neste caso, o potenciômetro foi substituído por um termistor.

Também foi usado o pino 2 do microcontrolador para conectar o circuito de aquisição de temperatura proposto ao PIC18F4550, e a tensão de referência foi regulada em: $V_{ref-} = 0\text{ V}$ e $V_{ref+} = +5\text{ V}$.

Para verificar a temperatura, após efetuar a conexão do circuito no pino 2, foi necessário efetuar uma nova calibração do termistor devido aos seguintes fatos:

1) O microcontrolador PIC18F4550 mede a variação da tensão elétrica e não da resistência elétrica (Ver item 3.2.1).

2) Ao variar a temperatura, o termistor não obedece à lei de Ohm, ou seja, a relação entre tensão, resistência e corrente elétrica não é mantida com a variação da temperatura, logo, mesmo conhecendo a resistência do material não é possível calcular a tensão sem conhecer a corrente elétrica, que oscila com a mudança da resistência do sensor.

3) Segundo Boylestad e Nashelsky (1998), há duas formas de variar a temperatura do termistor: externamente e internamente. A variação externa ocorre com a variação da temperatura do meio, enquanto a variação interna ocorre com a variação da corrente elétrica.

4) Para medir a resistência do termistor, um ohmímetro aplica uma tensão elétrica de 1,5 V ou 3 V. Esta tensão foi inferior a tensão aplicada ao termistor pelo microcontrolador, que era de 5 V.

Assim a realização da calibração do termistor acoplado ao microcontrolador foi realizada. Para que esta etapa pudesse ser desenvolvida foram executados os seguintes passos:

1) Adquiriu-se um termistor de 10 k Ω (valor nominal) que se acoplou ao hardware desenvolvido.

2) O termistor calibrado utilizando, como referência a temperatura do banho térmico do equipamento PolyScience Modelo 9112, foi conectado a um multímetro sendo este utilizado como referência na calibração do termistor acoplado ao hardware.

3) Aplicou-se uma tensão elétrica na pastilha termoeletrica e se esperou sua temperatura estabilizar.

4) Colocaram-se os termistores em contato com a pastilha termoeletrica. Para assegurar o contato do termistor com a pastilha termoeletrica foi usada pasta termica.

5) Efetuou-se a leitura da resistencia elétrica do termistor acoplado ao ohmímetro e se verificou qual a temperatura equivalente. Para tanto os valores mensurados foram aplicados na equação resultante da calibração do termistor, tendo como referência o PolyScience Modelo 9112.

6) Os valores registrados pelo microcontrolador PIC18F4550 foram plotados em um gráfico, no qual a abscissa representa a tensão elétrica em valor digital (de 0 a 1023) e a ordenada a temperatura equivalente.

Para realizar a visualização das informações registradas pelo microcontrolador, foi utilizada uma interface de saída capaz de mostrar os valores registrados pelo microcontrolador em um formato passível de compreensão humana.

Normalmente o display LCD é a interface de saída mais utilizada nos dispositivos eletrônicos de plataforma embarcada. No entanto, devido ao custo elevado do LCD, e por haver pinos I/O do microcontrolador ociosos, foram usados 10 (dez) LEDs como interface de saída. A Figura 26 apresenta o esquema do circuito eletrônico utilizado para a confecção da interface de saída. Cabe ressaltar que o circuito apresentado na Figura 26 foi aplicado em 10 pinos individualmente.

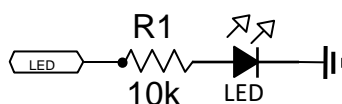


FIGURA 26 – ESQUEMA DO CIRCUITO PROPOSTO PARA A INTERFACE DE SAÍDA DE INFORMAÇÕES DO PIC18F4550.

O uso de 10 (dez) LEDs deve-se ao fato de o conversor A/D do microcontrolador ter resolução de 10 bits, ou seja, os valores gerados serão representado na escala de 0 a 1023, escritos na base 10, sendo este reescrito na base 2 e os valores apresentados na interface constituída com LEDs.

Para que o microcontrolador fosse capaz de executar a conversão do valor escrito na base 10 para a base 2, foi necessário desenvolver um *firmware* com instruções para realizar tal procedimento. Para tanto, foi utilizado o software MPLAB IDE v8.76.

3.2.3.5 Esquema do circuito eletrônico proposto para o controle da energia elétrica aplicada ao ventilador e pastilha termoeletrônica

O sistema de refrigeração foi constituído de três partes distintas: 1) Pastilha termoeletrônica, 2) Dissipador térmico, e 3) Ventilador; como apresentado na Figura 27.

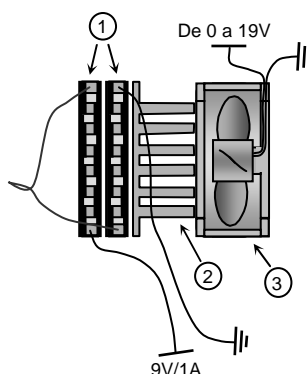


FIGURA 27 – CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS PARA MONTAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.

Destas três partes que compõem o sistema de refrigeração, duas delas necessitam de energia elétrica para realizar suas funções: a pastilha termoeletrônica e o ventilador. Entre elas, a pastilha termoeletrônica é a que consome mais energia elétrica. Sendo assim, com a finalidade de reduzir o consumo de energia elétrica e aumentar a autonomia do sistema, foi necessário que o hardware fosse capaz de realizar as operações propostas no fluxograma apresentado na Figura 18, o qual propõe que para cada mensuração da temperatura que o microcontrolador executa, devendo realizar uma das seguintes operações:

- 1) Aplicar a energia elétrica máxima disponível ao ventilador e acionar a pastilha termoeletrônica.
- 2) Desligar o ventilador e a pastilha termoeletrônica.
- 3) Aumentar ou diminuir a energia elétrica aplicada ao ventilador e manter a pastilha termoeletrônica desligada.

Pelas operações efetuadas pelo microcontrolador, a pastilha termoeletrônica tem apenas dois estados: ligada ou desligada. Já o ventilador tem quatro estados: ligado, desligado, rotação aumentada e/ou reduzida, buscando assim a estabilização da temperatura desejada e a minimização do consumo de energia elétrica.

Para definir a temperatura em que o sensor foi mantido levou-se em consideração as seguintes observações: a) A corrente escura sofre uma redução por um fator de aproximadamente 2 (dois) para cada redução de 10 °C na temperatura do sensor. b) Ao atingir temperatura inferior a aproximadamente 15 °C (esta temperatura pode variar conforme a variação da umidade relativa do ar do ambiente onde o sensor se encontra) a água é condensada e depositada sobre o corpo refrigerado. c) Quanto mais baixa for a temperatura, maior será o consumo de energia elétrica pelos elementos que compõem o sistema de refrigeração. Assim, a temperatura do sistema foi estabelecida a 20,0 °C com uma incerteza de $\pm 0,3$ °C.

Para controlar a velocidade do ventilador, foi empregado o circuito elétrico, apresentado na Figura 28, conectado à saída PWM do microcontrolador que, no caso do PIC18F4550, foi o pino 17. Também a alimentação do ventilador foi realizada com uma fonte de tensão elétrica de 19 V.

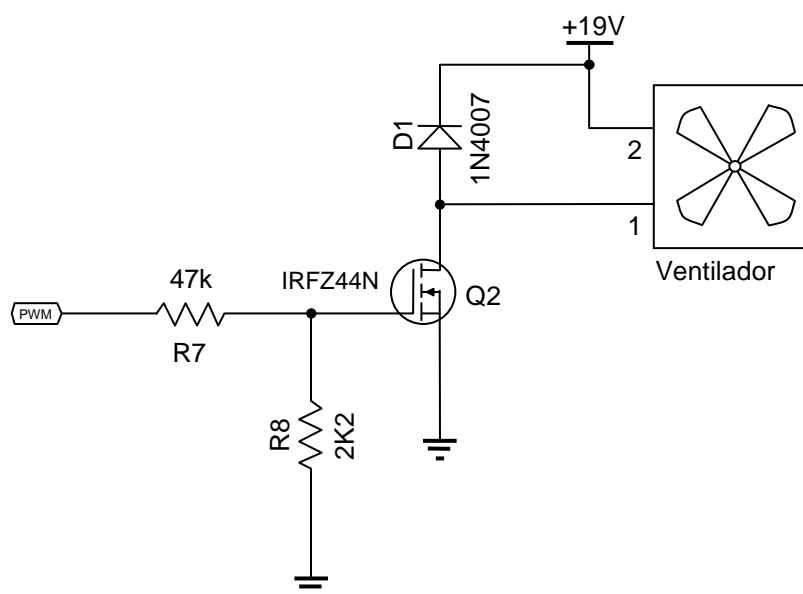


FIGURA 28 – ESQUEMA DO CIRCUITO DE CONTROLE DA VELOCIDADE DO VENTILADOR.

FONTE: Adaptado de Microchip (2009).

Para controlar a energia elétrica aplicada na pastilha termoeletrica, foi empregado o mesmo circuito apresentado na Figura 28 com algumas alterações, como apresentado na Figura 29.

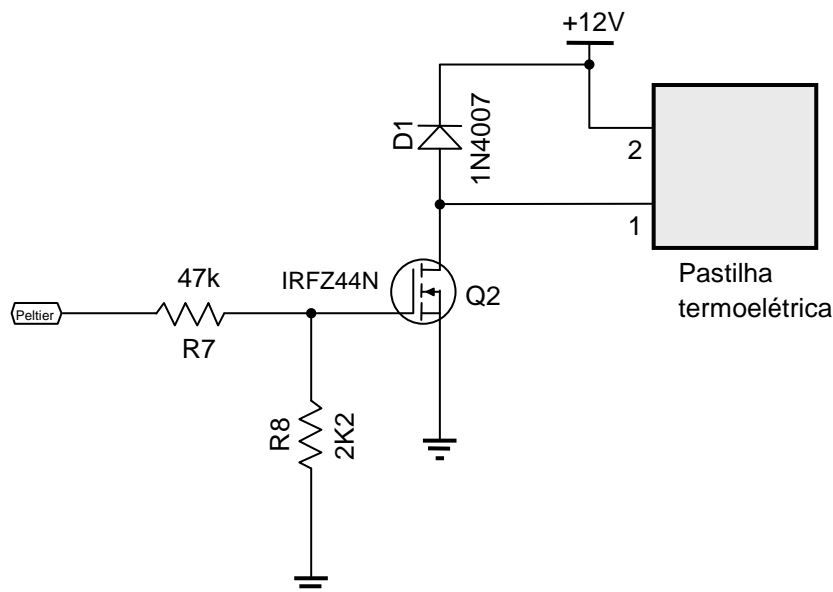


FIGURA 29 – ESQUEMA DO CIRCUITO DE CONTROLE DA ENERGIA ELÉTRICA ENTREGUE À PASTILHA TERMOELÉTRICA.

O circuito apresentado na Figura 29 foi conectado ao pino 36 do microcontrolador PIC18F4550. Para alimentar a pastilha termoelétrica foi utilizada uma fonte de tensão elétrica de 9 V e corrente de 1 A.

Para que o microcontrolador fosse capaz de realizar as operações desejadas, foi necessário fornecer ao mesmo as rotinas de execução (firmware). As rotinas instaladas no microcontrolador foram elaboradas e implementadas utilizando o compilador MPLAB IDE v8.76.

3.3 SISTEMA ÓPTICO

3.3.1 Lentes Para Coleta e Focalização Da Radiação Eletromagnética

Neste trabalho foi empregada uma lente bi-convexa (Figura 30a) com: 50 mm de diâmetro; com distância focal efetiva de 208 mm; e raios de curvaturas (R_1) de 1250 mm e (R_2) de -1250 mm. Também foi utilizada uma lente plano-convexa (Figura 30b) com: 50 mm de diâmetro; com espessura no centro de 12 mm e na borda com 1,86 mm; distância focal efetiva de 50 mm; e raios de curvaturas (R_1) de 39,24 mm e (R_2) infinito (∞).

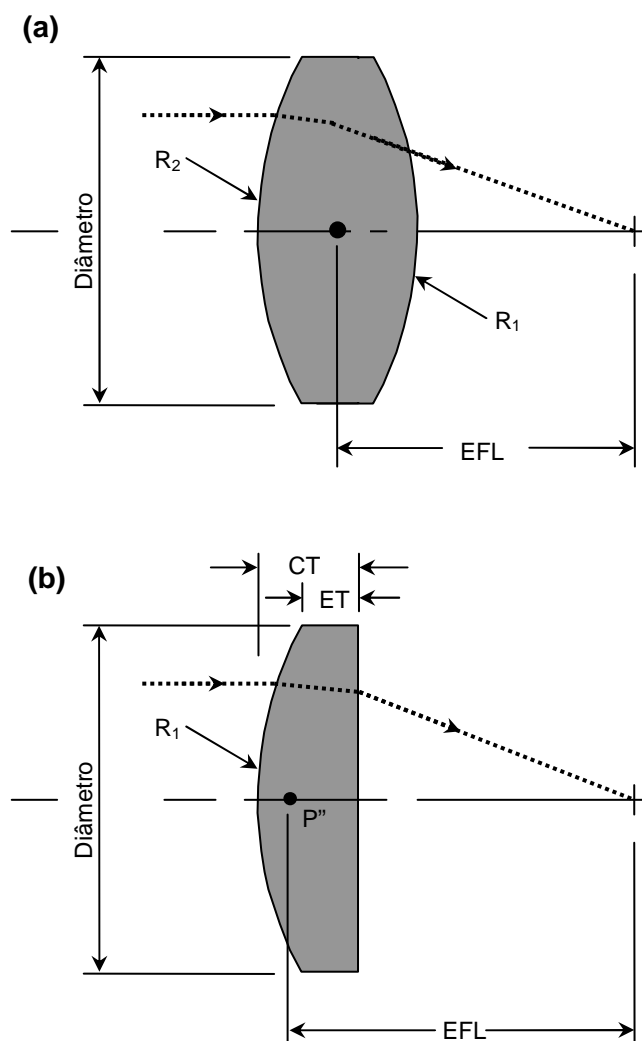


FIGURA 30 – A) LENTE BI-CONVEXA B) LENTE PLANO-CONVEXA. ONDE: EFL = DISTÂNCIA FOCAL EFETIVA; R_1 E R_2 = RAIO; ET = ESPESSURA DA BORDA; CT = ESPESSURA DO CENTRO.

FONTE: Adaptado de Optics (2012)

A lente bi-convexa foi empregada no sistema para efetuar a coleta do fluxo de radiação refletido pelo objeto e a plano-convexa para focalizar o fluxo de radiação difratada no detector.

O campo de visada do protótipo de espectrorradiômetro proposto foi de aproximadamente 13° .

3.3.2 Sistema Para Visualização do Objeto

Para desenvolver o sistema de visualização da área que preenche o campo de visada do protótipo, empregou-se um espelho semitransparente que reflete 50% da energia coletada e transmite os 50% excedentes (Figura 31).

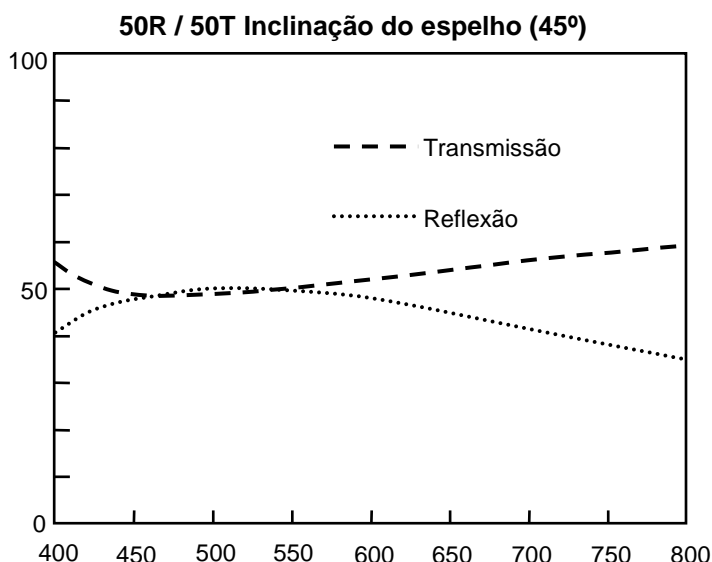


FIGURA 31 – CURVA DA EFICIÊNCIA TÍPICA DA REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DO ESPELHO SEMITRANSARENTE.

FONTE: Adaptado de Optics (2012)

Este espelho foi alocado entre a lente coletora do fluxo de radiação eletromagnética e a fenda de entrada de luz no espectrorradiômetro, formando um ângulo de 45° em relação ao eixo óptico do sistema (Figura 32).

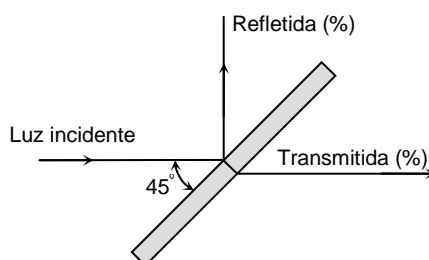


FIGURA 32 – ESPELHO SEMI-TRASPARENTE.

FONTE: Adaptado de Optics (2012)

Para coletar o fluxo de radiação refletido pelo espelho semitransparente, utilizou-se uma WebCam (Figura 33) que possui um detector do tipo CMOS com 300 Kpixel.



FIGURA 33 – WEBCAM EROS DA BRIGHT UTILIZADA PARA CAPTURAR A IMAGEM DO OBJETO OBSERVADO.

FONTE: Multilaser (2011).

A webcam, sistema sensor, foi operada no modo vídeo, com um taxa de captura de 30 *frames* por segundo. A transferência de dados entre o sistema sensor e o microcomputador foi realizada via conexão USB2.0.

3.3.3 Fenda de Entrada de Luz no Espectrorradiômetro

Com a finalidade de limitar a intensidade do fluxo de radiação eletromagnética que entra no sistema, evitando a saturação do sensor e a eliminação de sinais espúrios, foi utilizada uma placa com uma fenda de 0,5 mm de largura x 20 mm de altura (Figura 34).

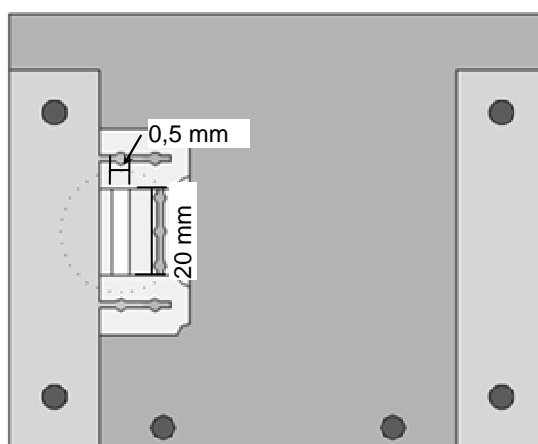


FIGURA 34 – FENDA DE ABERTURA DE LUZ NO ESPECTRORRADIÔMETRO.

Para a confecção da fenda foram utilizadas quatro lâminas de barbear soldadas em uma placa de circuito impresso.

3.3.4 Individualização do Espectro Eletromagnético

Para realizar a difração do fluxo REM na faixa do espectro eletromagnético compreendida entre 450 nm e 700 nm, foi utilizada uma rede de difração.

Com uma dimensão de 50 mm x 50 mm, a rede de difração possui 600 linhas por mm, resultando numa constante (d) igual a 1666,67 nm. A curva da eficiência típica da rede de difração empregada é apresentada na Figura 35.

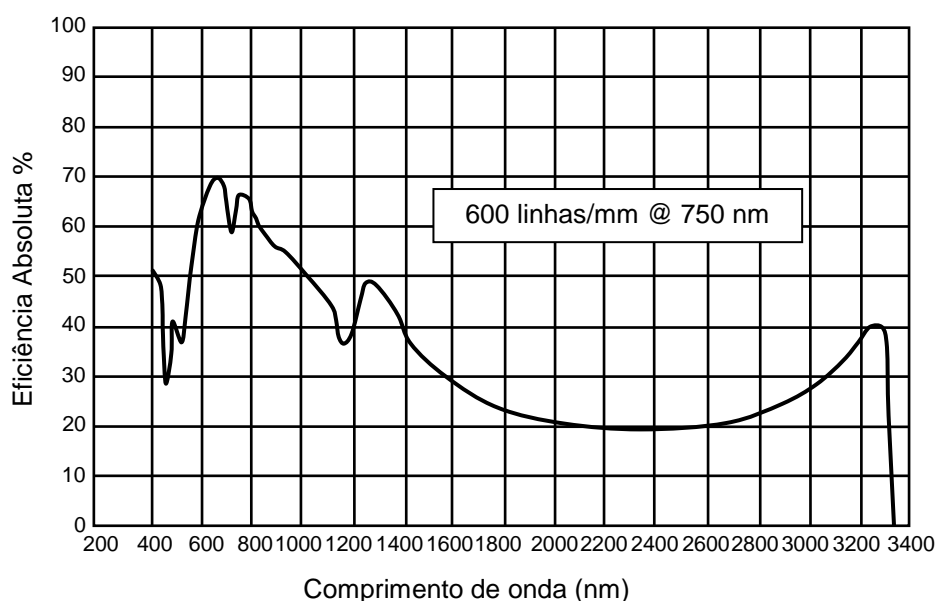


FIGURA 35 – CURVA DA EFICIÊNCIA TÍPICA DA REDE DE DIFRAÇÃO OTIMIZADA (BLAZE) PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DE 750 NM.

FONTE: Adaptado de Optics (2012)

A dispersão para o comprimento de onda de 450 nm é de $D_{450} = 35,70^\circ / \mu\text{m}$ e para o comprimento de onda de 700 nm de $D_{700} = 37,88^\circ / \mu\text{m}$.

Normalmente, os espectros produzidos em ordens muito elevadas sofrem sobreposição espectral. Além disso, a intensidade do fluxo de REM é reduzida. Isto ocorre devido ao fato de a energia disponível ser dividida entre diversos máximos de difração da rede. Para contornar este problema, adotou-se uma rede de difração

com ângulo *Blaze* de 13° (Figura 36) e as medidas foram realizadas sobre os espectros produzidos na ordem 1.

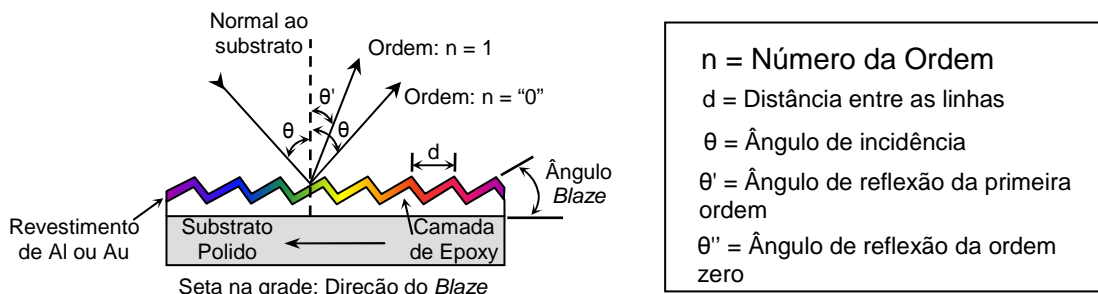


FIGURA 36 – ÂNGULO BLAZE.

FONTE: Adaptado de Optics (2012)

3.3.5 Detecção do Fluxo de Radiação Eletromagnética Difrutado

A WebCam modelo DotStore (Figura 37) foi utilizada para registrar a intensidade do fluxo de REM difratada pela rede de difração.

O detector desta WebCam é um sensor CMOS, do tipo quadro com 800 colunas e 600 linhas, resultando em 480 Kpixels efetivamente ativos. Esta WebCam também possui quatro LEDs que, ao serem acionados, emitem um fluxo de radiação eletromagnética com comprimentos de onda pertencentes à faixa do espectro do visível (Luz branca), que foram removidos para evitar interferência.



FIGURA 37 – WEBCAM DOTSTORE DA MULTILASER UTILIZADA PARA REGISTRAR O FLUXO DE RADIAÇÃO DIFRATADO.

FONTE: Multilaser (2011).

A WebCam, quando operada no modulo vídeo, registra 30 *frames* por segundo, ou seja, uma imagem é capturada a cada 33,33 milésimos de segundo.

A comunicação da WebCam com o microcomputador foi realizada via USB 2.0 com uma taxa de transferência de dados de aproximadamente 480 megabits por segundo (Mbps). Cabe ressaltar que seu detector já veio acoplado ao hardware que controla o processo de captura do fluxo de REM e converte a carga gerada em valor digital. Este valor era enviado para a unidade de processamento (microcomputador), onde os dados foram organizados e disponibilizados para apreciação. Para tanto, foi necessário instalar o *driver* que possui instruções dos passos que o microcomputador deve efetuar para processar os dados obtidos e controlar as operação do hardware da WebCam.

Por ser um detector comum, seu manual não traz informações técnicas detalhadas a seu respeito, como por exemplo: a amplitude espectral, a dimensão de cada pixel, a dimensão da área ativa, a eficiência de transferência de carga, a relação entre corrente escura versus temperatura e amplitude da faixa de temperatura de operação. Isto se deve ao fato de estas informações serem de cunho técnico e de pouca relevância para o usuário comum.

3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Nesta etapa do desenvolvimento do protótipo são apresentados os mecanismos desenvolvidos para fixar os componentes do espectrorradiômetro na sua base de acondicionamento. Esta base é uma placa de alumínio de 350 mm x 350 mm x 10 mm.

Na base de acondicionamento foram abertos furos com rosca para fixar os elementos que exigem pouco grau de liberdade de movimentação, bem como bilombos para os elementos que necessitam de grau de liberdade de movimentação quando fosse necessário efetuar o alinhamento do sistema óptico.

Para minimizar o registro de energia oriunda da reflexão interna, todos os elementos desenvolvidos para fixar os componentes ópticos, detectores e a base de acondicionamento foram revestidos com tinta cor preto fosco.

A seguir são apresentados os elementos desenvolvidos para fixar os componentes na base de acondicionamento.

3.4.1 Suporte para Fixação da Lente Coletora de Radiação Eletromagnética

Para fixar a lente coletora de radiação eletromagnética, foram utilizados: três adaptadores PBS de PVC com bolsa e rosca, um conector de tubo com rosca e um pedaço de tubo PVC. Estes elementos foram conectados uns aos outros de forma que possibilitem a fixação da lente em uma extremidade e, na outra, ficou o adaptador PBS de PVC para fixar o conjunto numa placa de alumínio, que acopla na base (Figura 38).

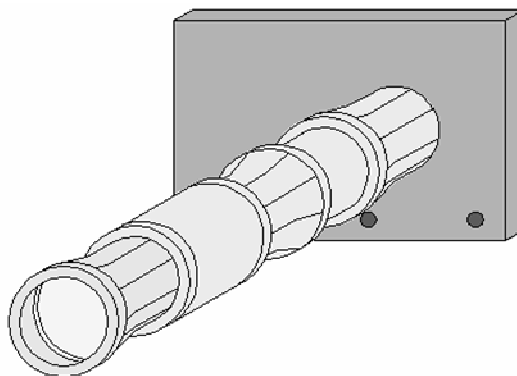


FIGURA 38 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

Para fixar o conjunto na base, foi aberto um orifício em uma placa de alumínio de 200 mm x 90 mm x 10 mm, o que possibilitou rosquear o conjunto (Figura 38).

3.4.2 Suporte para Fixação do Espelho Semi-Transparente

Na parte superior de uma peça de alumínio de 56 mm de base x 25 mm de altura e 10 mm de largura, foi aberto um canal de 50 mm x 5 mm x 1 mm para prender o espelho semi-transparente (Figura 39).

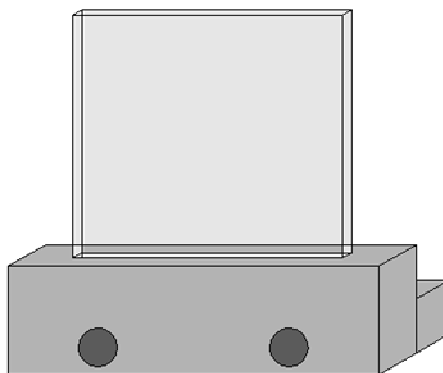


FIGURA 39 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMITRANSARENTE.

A peça apresentada na Figura 39 foi posicionada e fixada na base de acondicionamento, perfazendo um ângulo de 45° com o eixo do fluxo de radiação eletromagnética coletado pela lente coletora de REM, conforme recomendado pelo fabricante.

3.4.3 Suporte para Fixar a WebCam Responsável pelo Registro da Imagem do Objeto em Estudo

Para fixar a WebCam responsável pelo registro da imagem do objeto, foi desenvolvido um mecanismo que possibilitou movimentar a mesma no eixo x, y, z e rotacioná-la em torno do eixo y conforme Figura 40.

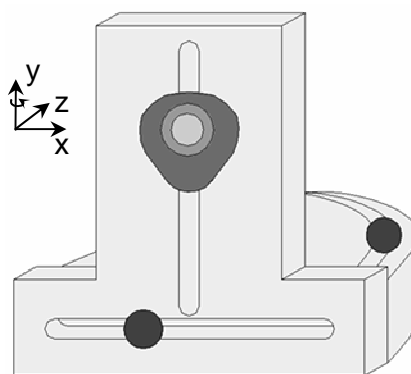


FIGURA 40 – SUPORTE PARA FIXAR A WEBCAM RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO.

Os movimentos nos eixos contribuíram significativamente no momento de efetuar o alinhamento e posicionamento da WebCam, de modo a captar todo o fluxo de REM refletido pelo espelho semitransparente.

3.4.4 Fixação da Fenda de Entrada de REM no Espectrorradiômetro

A Figura 41 apresenta o suporte desenvolvido para fixar a fenda de entrada de REM na base de acondicionamento.

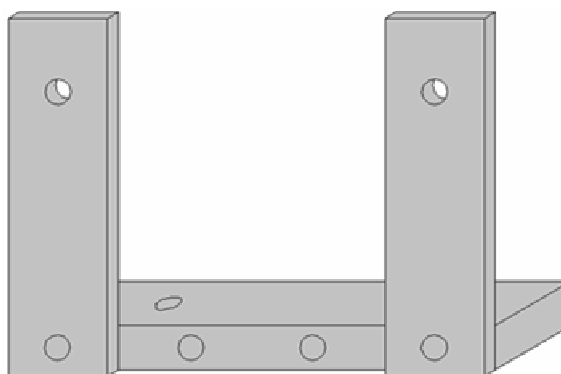


FIGURA 41 – FENDA DE ABERTURA DE LUZ NO ESPECTRORRADIÔMETRO.

O mecanismo apresentado na Figura 41 foi constituído de três partes: uma para sustentar e fixar o conjunto na base e as demais para garantir a verticalidade da fenda.

3.4.5 Suporte para Fixar a Rede de Difração

O mecanismo desenvolvido para fixar a rede de difração na base de acondicionamento é apresentado na Figura 42, onde estão: a mesa (1), os parafusos calantes (2), o suporte para fixar a rede de difração (3) e a rede de difração (4).

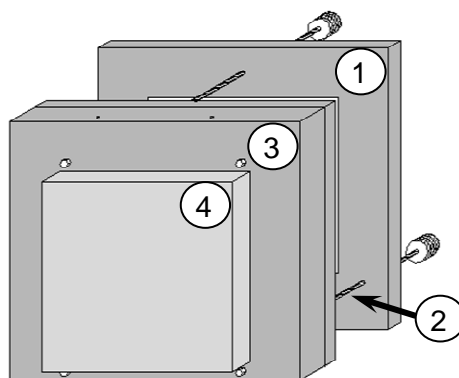


FIGURA 42 – SUPORTE PARA FIXAÇÃO DA REDE DE DIFRAÇÃO.

O desenvolvimento da configuração desta estrutura permitiu que, mesmo quando fixada na base, o suporte que prende a rede de difração fosse movimentado com o auxílio dos parafusos calantes. Tais movimentos permitiram efetuar a mudança do ângulo de incidência do fluxo de REM sobre a rede de difração, alterando conseqüentemente o ângulo de dispersão do fluxo difratado.

3.4.6 Suporte para Fixação da Lente que Focaliza o Fluxo de Radiação Difrataado no Detector

A fixação da lente responsável pela focalização do fluxo de radiação difratado no detector, foi realizada pelo uso de um mecanismo que possibilita movimentar a mesma no eixo x, z e rotacioná-la em torno do eixo y (Figura 43).

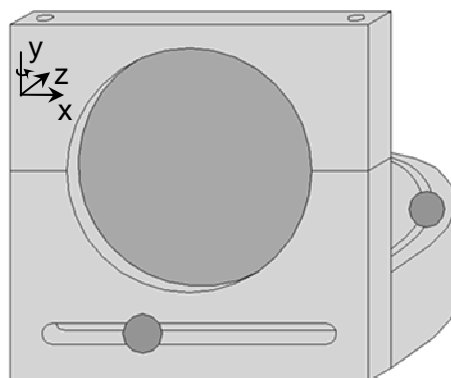


FIGURA 43 – SUPORTE PARA FIXAR ALENTE QUE FOCALIZA O FLUXO DE RADIAÇÃO DIFRATADO NO DETECTOR NA BASE DO PROTÓTIPO.

Os movimentos da peça possibilitaram conseguir melhor posicionamento da lente para coletar o fluxo de radiação difratado.

Com auxílio de dois parafusos foi realizada a fixação das partes superior e inferior da peça que fixa a lente no suporte.

3.4.7 Fixação do Detector do Fluxo de REM Difratado

O detector do fluxo de radiação foi acoplado em uma placa de circuito impresso com o auxílio de quatro parafusos (Figura 44).

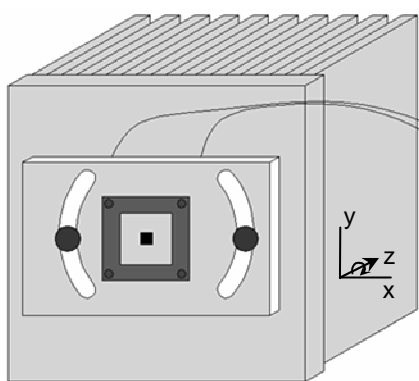


FIGURA 44 – FIXAÇÃO DO DETECTOR DE COLETA DO FLUXO DE REM DIFRATADO.

Nas laterais da placa de circuito impresso foram abertos dois bilombos circulares para efetuar a rotação do detector no eixo z.

Para prender o conjunto na base de acondicionamento, foram abertos dois bilombos. A movimentação deste conjunto ocorre apenas no eixo z.

A troca de calor entre os componentes deste sistema foi assegurada pelo emprego de pasta térmica nas suas junções.

3.5 APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO

Os dados obtidos com o protótipo montado foram enviados ao microcomputador, onde foram processados e disponibilizados para visualização em tela. Para tanto, foi desenvolvido um aplicativo (software) capaz de realizar as operações apresentadas na Figura 45.

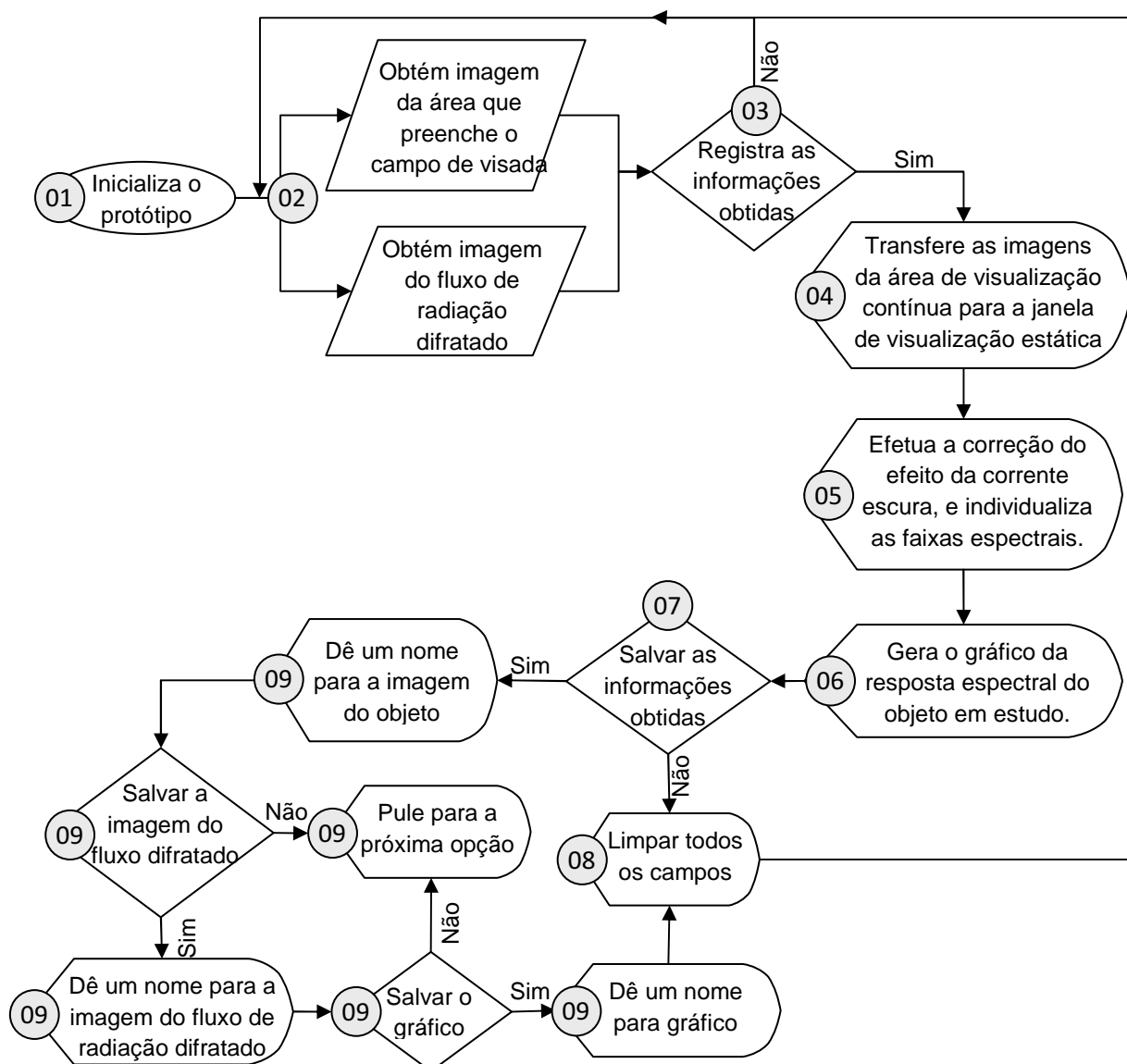


FIGURA 45 – FLUXOGRAMA DAS FUNÇÕES DO APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO.

A primeira função do aplicativo foi inicializar o sistema (01). Ao iniciá-lo, o mesmo recebeu dois grupos de informações, sendo um grupo oriundo do detector que registra a imagem do objeto e o outro grupo oriundo do detector que registra a intensidade do fluxo de REM difratado. Estes conjuntos de dados foram disponibilizados continuamente em tela pelo aplicativo em forma de vídeo em *displays* distintos (02).

Para se fazer o registro das informações obtidas (03), os dados mostrados nos *displays* de visualização contínua foram transferidos para os *displays* de

visualização estática (04). Em seguida foi executada a correção do efeito da corrente escura (05).

Para efetuar a correção do efeito da corrente escura aplicou-se o método de subtração de matrizes, conforme apresentado abaixo (Figura 46):

$$\begin{array}{l}
 \left[\begin{array}{c} \text{Banda} \\ \text{Vermelho} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Coeficientes de correção do} \\ \text{efeito da corrente escura da} \\ \text{banda Vermelho} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Banda Vermelho isenta dos} \\ \text{erros oriundos do efeito da} \\ \text{corrente escura} \end{array} \right] \\
 \\
 \left[\begin{array}{c} \text{Banda} \\ \text{Verde} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Coeficientes de correção do} \\ \text{efeito da corrente escura da} \\ \text{banda verde} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Banda do verde isenta} \\ \text{dos erros oriundos do} \\ \text{efeito da corrente escura} \end{array} \right] \\
 \\
 \left[\begin{array}{c} \text{Banda} \\ \text{azul} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Coeficientes de correção do} \\ \text{efeito da corrente escura da} \\ \text{banda do azul} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Banda azul isenta dos erros} \\ \text{oriundos do efeito da} \\ \text{corrente escura} \end{array} \right]
 \end{array}$$

FIGURA 46 – CORREÇÃO DO EFEITO DA CORRENTE ESCURA.

As Bandas: Vermelho, Verde e Azul foram as bandas da imagem gerada no detector, que registra o fluxo de REM difratado. Os coeficientes de correção do efeito da corrente escura das bandas foram os valores médios do ND de cada pixel.

Após efetuar as correções dos dados, inicia-se o processo de individualização das faixas espectrais (05), que geram um gráfico que representa a resposta espectral do objeto (06).

Os dados obtidos foram descartados e/ou armazenados (07). Ao optar em descartá-los, o aplicativo limpou o gráfico e os *displays* de visualização estática (08). Por outro lado, quando se optou por armazená-los, o aplicativo possibilitou ao usuário salvar individualmente as imagens e o gráfico. Para tanto foi disponibilizado um campo onde o usuário pode atribuir um nome para cada grupo de dados e escolher o diretório onde desejava salvá-las (09).

O desenvolvimento do aplicativo capaz de executar as operações mencionadas, foi realizado empregando o compilador Borland Delphi.

A seguir são apresentados os métodos utilizados para: 1) Obter os coeficientes de correção da corrente escura e identificar os pontos *blemishes*; 2) Identificar os pixels que definem cada faixa espectral.

3.6 OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CORREÇÃO DO EFEITO DA CORRENTE ESCURA E IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS BLEMISHES

Os coeficientes de correção do efeito da corrente escura e identificação dos pontos *blemishes*, foram obtidos pela avaliação de um conjunto de imagens obtidas em ambiente escuro com a temperatura do detector mantida a $20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A avaliação dos resultados, foi realizada, adotado e adaptado o método descrito por Tavares Jr. *et. al* (2010). Sendo assim foram construídos histogramas (3ª Etapa – Figura 47) representando os valores: médio ($V_{\text{médio}}^g = \text{mean}(A)$) e desvio padrão ($V_{\text{Desvipad}}^g = \text{std}(A)$), onde ($A = p(l,c,k)$; p é o pixel na posição (c,l), e l o número da linha, c o número da coluna e k o número de dados que compõem o conjunto em análise) da tensão elétrica (representada em ND) gerada (V^g) (2ª Etapa – Figura 47) em cada pixel do conjunto de dados (1ª Etapa – Figura 47) adquirido em ambiente escuro, como pode ser observado no fluxograma da Figura 47.

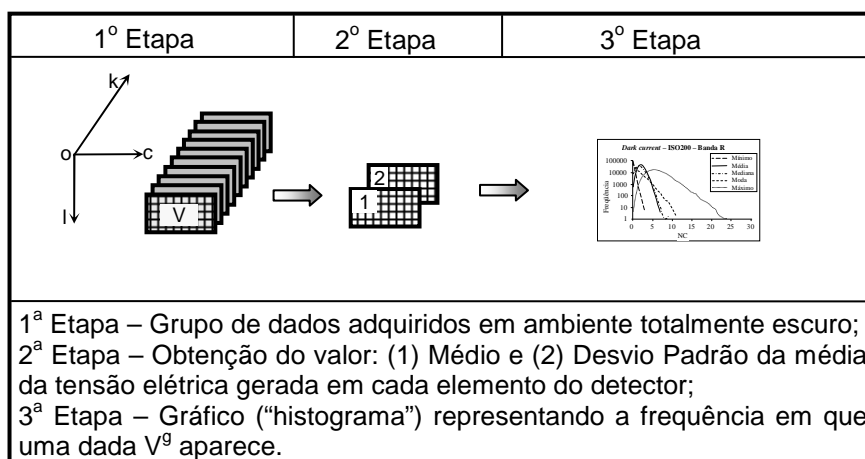


FIGURA 48 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA AVALIAR O EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO DETECTOR.

A identificação e localização dos pontos *blemishes*, foi realizada utilizando a teoria da distribuição normal, a qual pressupõe que a medida de uma grandeza tende a se agrupar em torno de um valor médio, em que a probabilidade de ocorrência é máxima próximo a este valor e diminui com o afastamento do mesmo. Neste trabalho foi admitido que 1% dos pixels possuem defeitos de fabricação, ou seja, a probabilidade do erro máximo ser excedido foi de 1%.

Assim, aplicou-se o seguinte critério para identificar os pontos *blemishes* na imagem:

se $V > \bar{V} + 2,5\sigma \Rightarrow$ é ponto *blemish*

Caso contrário,

se $V \leq \bar{V} + 2,5\sigma \Rightarrow$ não é ponto *blemish*

Onde:

$\bar{V} \Rightarrow$ Média da tensão elétrica gerada expressa em número digital;

$V \Rightarrow$ Tensão elétrica gerada expressa em número digital, em análise;

$\sigma \Rightarrow$ Desvio padrão médio expresso em número digital.

3.7 IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINEM AS FAIXAS ESPECTRAIS

A identificação da posição dos pixels do detector que definem cada faixa espectral, foi realizada utilizando o espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – *Visible Spectrophotometer*) seguindo a configuração apresentada na Figura 48, onde temos: Espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (UV – *Visible Spectrophotometer*) (1) e o Protótipo (2).

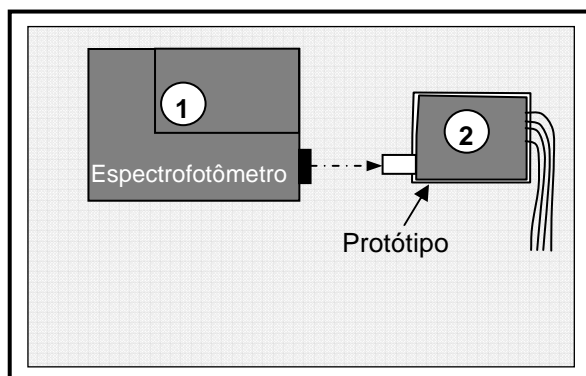


FIGURA 48 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA DETERMINAR A POSIÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINE AS FAIXAS ESPECTRAIS.

O espectrofotômetro supracitado é um equipamento capaz de emitir um fluxo de luz monocromático dentro da faixa espectral compreendida de 350 a 900 nm, sendo regulável a largura de banda do feixe de REM emitido (através da fenda de saída do equipamento).

Como fonte de radiação eletromagnética utilizou-se uma lâmpada de Tungstênio do espectrofotômetro - Beckman Acta MIV (*UV – Visible Spectrophotometer*). A fenda de abertura da saída foi ajustada a 150 μm , o que se traduz por uma resolução espectral de 0,3 nm e, em seguida, efetuou a varredura em todo o espectro.

Para obter os valores que representam a intensidade do fluxo de radiação eletromagnética emitido pelo espectrofotômetro, efetuou-se a decomposição da imagem em suas componentes R (Red), G (Green) e B (Blue). Isto se deve ao fato de que o detector da WebCam, assim como os das câmaras fotográficas, possuem uma grade de filtro - Filtro de Bayer - que permite apenas determinados comprimentos de onda sensibilizem o detector, gerando três bandas espectrais: uma na faixa do azul, uma na faixa do verde e a outra na faixa do vermelho.

Gráficos representando a intensidade do fluxo de radiação emitido pelo espectrofotômetro foram elaborados para avaliar os resultados obtidos em laboratório. No gráfico foi plotado o valor médio dos pixels de cada faixa espectral, conforme apresentado na Figura 49.

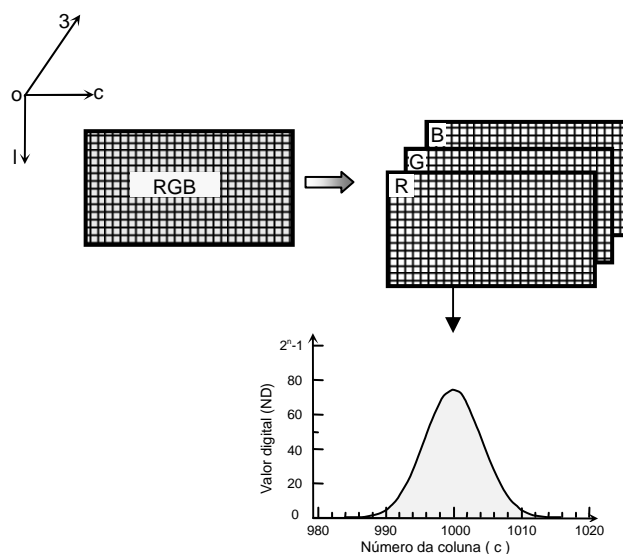


FIGURA 49 – ELABORAÇÃO DO GRÁFICO PARA DEFINIR A POSIÇÃO DAS FAIXAS ESPECTRAIS.

A intensidade do fluxo de radiação de luz monocromática registrada pelo detector segue a distribuição de Gauss. Para avaliar os resultados, os valores foram ajustados à forma Gaussiana, sendo a amplitude nominal definida pelo critério da Largura a meia altura (FWHM - *Full Width at Half Maximum*) (Figura 50).

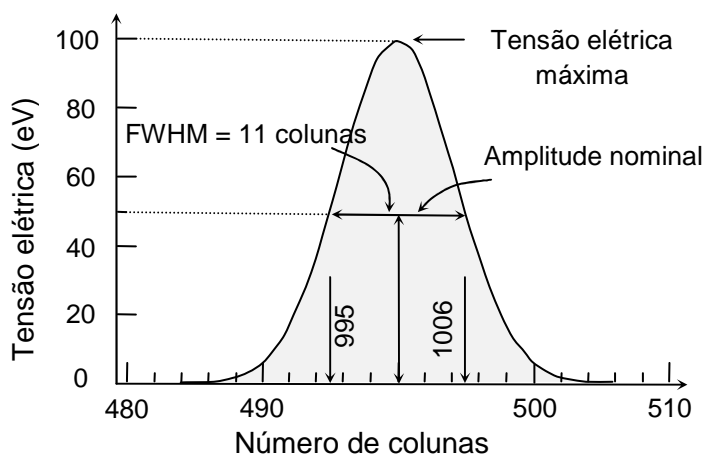


FIGURA 50 – INTERVALO ESPECTRAL DEFINIDO COM BASE NO CRITÉRIO DA LARGURA A MEIA ALTURA (FWHM).

FONTE: Clark (1999)

De posse dos resultados obtidos da aplicação do critério FWHM foi possível identificar as colunas que definem cada faixa espectral, que são indicadas no software de processamento dos dados.

3.8 SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO

Na avaliação do comportamento do protótipo mediante a variação da intensidade de REM foram obtidos três conjuntos de dados. Para tanto, foi utilizada uma lanterna de LEDs comercial como fonte de REM.

O primeiro conjunto de dados registrou as informações do fluxo de REM de baixa intensidade, o segundo de média intensidade e o terceiro de alta densidade.

Cada conjunto contém: uma imagem do objeto, uma imagem do fluxo de REM difratado e o gráfico que descreve o comportamento espectral da fonte de REM.

3.9 VALOR EM REAIS DESPENDIDO NA CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO

Para calcular o valor em reais dispendido na concepção do protótipo, foi elaborada uma tabela com quatro colunas onde foi registrado o tipo de produto e/ou serviço utilizado, a quantidade utilizada de cada elemento, o valor em reais de cada unidade e o valor total gasto. O valor final dispendido na construção do protótipo foi dado pela soma dos valores registrados.

A cotação de um produto mundialmente aceito na comunidade científica foi efetuada, e comparado o seu valor agregado com a construção do protótipo proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR DESACOPLADO DO *HARDWARE*

Na calibração do termistor, os valores obtidos utilizando o multímetro e o banho térmico foram plotados em um gráfico, em que a abscissa representa a resistência elétrica do termistor e a ordenadas a temperatura equivalente, como pode ser observado na Figura 51.

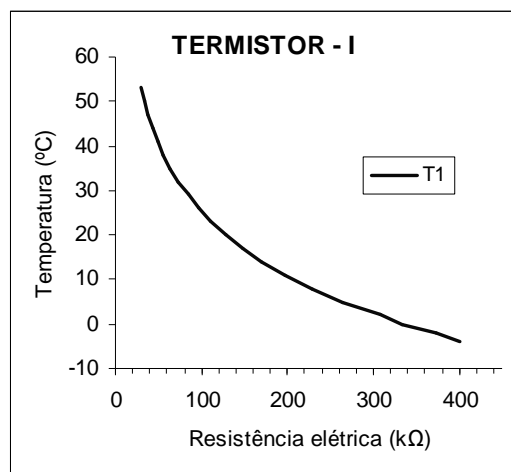


FIGURA 51 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 51, constata-se que a relação resistência elétrica x temperatura apresenta forma exponencial, conforme descrito por SZE e NG (2007). Os dados plotados foram ajustados, obtendo-se a Equação 06.

$$t = t0 + A1 * e^{(-k\Omega / t1)} + A2 * e^{(-k\Omega / t2)} + A3 * e^{(-k\Omega / t3)} \quad \text{Equação 06}$$

em que, (t) é a temperatura correspondente à resistência elétrica observada; $(k\Omega)$ é a resistência elétrica observada do termistor (kohms); $t0$, $A1$, $A2$, $A3$, $t1$, $t2$ e $t3$ são os coeficientes ajustados, sendo seus valores apresentados na Tabela 01.

TABELA 01: VALORES DOS COEFICIENTES AJUSTADOS PARA A EQUAÇÃO 6.

Termistor	Coeficientes ajustados						
	$t0$ (°C)	$A1$ (°C)	$t1$ (Ω)	$A2$ (°C)	$t2$ (Ω)	$A3$ (°C)	$t3$ (Ω)
T1	-18,36013	42,53404	31,23236	57,88934	254,1428	2,78001	$-1,98 \times 10^{89}$

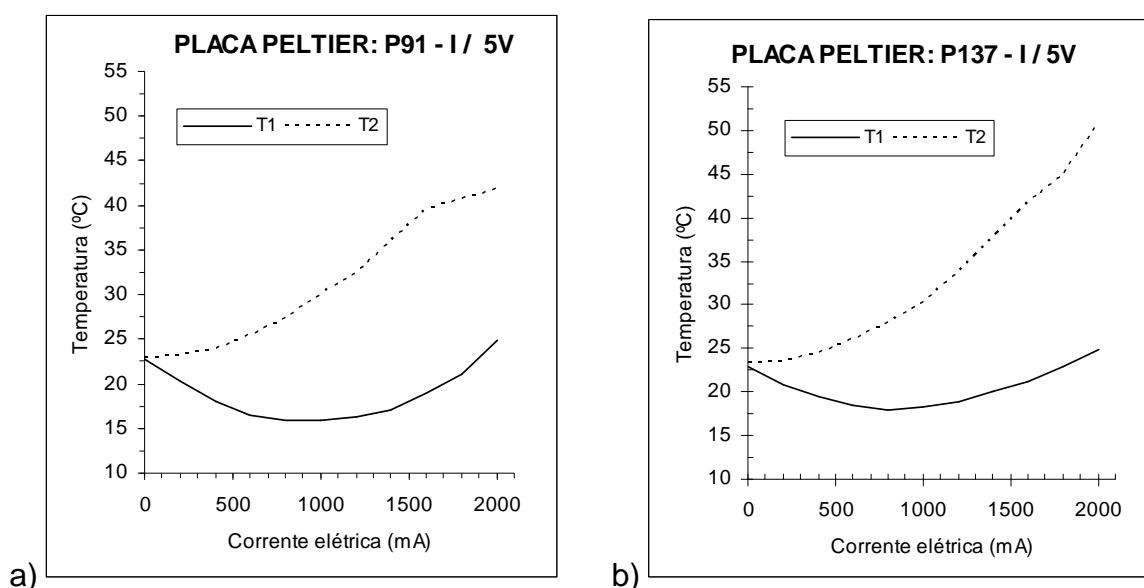
Cabe ressaltar que os coeficientes obtidos e representados na Tabela 01 são referentes ao termistor empregado. Caso seja necessário empregar outro termistor, recomenda-se que se efetue sua calibração, mesmo utilizando termistor confeccionado pelo mesmo fabricante, pois há probabilidade de haver variação no processo de confecção do dispositivo.

Ao se avaliar o gráfico exposto na Figura 50, constata-se que o termistor empregado foi mais sensível à baixa temperatura do que à temperatura mais elevada. Isto se deve ao fato de que uma pequena variação na faixa de baixas temperaturas causa maior diferença na resistência elétrica do termistor; por outro lado, quando em temperaturas mais elevadas, o processo se manifesta de maneira inversa.

Com o intuito de demonstrar a eficiência e aplicabilidade do termistor já calibrado, foi executado um experimento na área da Ciências Geodésicas, apresentado no artigo “*Estabilização da temperatura da câmara digital Magi DC575 utilizando pastilha termoeletrica para obtenção dos parâmetros de correção do efeito da corrente escura*”, publicado na *Revista Brasileira de Cartografia* Nº 63/03, 2011. p. 361 a 375.

4.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS Q_{MAX} , I_{MAX} E ΔT_{MAX} DA PASTILHA TERMOELÉTRICA

Os resultados obtidos com as medidas efetuadas nas configurações da Figura 16 foram plotados em um gráfico, no qual a abscissa representa a corrente elétrica aplicada no dispositivo, e ordenada a temperatura do sistema, como se pode observar na Figura 52.



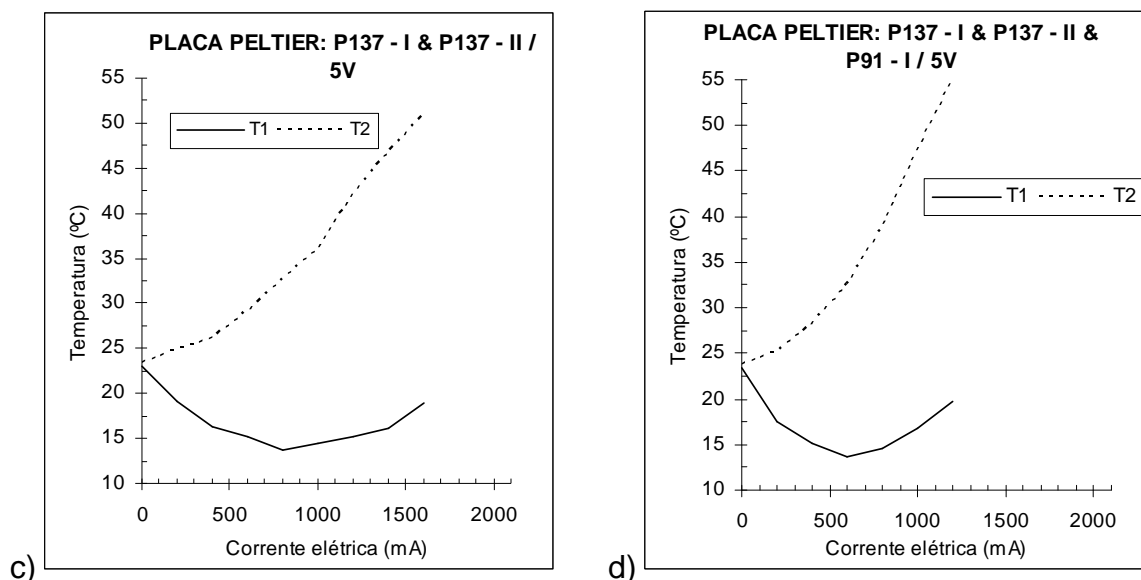


FIGURA 52 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO UTILIZANDO PASTILHA TERMOELÉTRICA. A) MONTAGEM I COM A PASTILHA TERMOELÉTRICA P91-I; B) MONTAGEM I COM A PASTILHA P137-I; C) MONTAGEM II COM AS PASTILHAS P137-I E P137-II; D) MONTAGEM COM AS PASTILHAS P137-I, P137-II E P91-I. SENDO: T1 A TEMPERATURA DO LADO FRIO E T2 A TEMPERATURA DO LADO QUENTE

Os valores de Q_{\max} , I_{\max} e ΔT_{\max} foram extraídos dos gráficos apresentados na Figura 52, e expressos na Tabela 02.

TABELA 02: VALORES DE Q_{\max} , I_{\max} E ΔT_{\max} OBSERVADO NA FIGURA 20.

Pastilha Termoelétrica	I_{\max}	Lado frio		Lado quente		ΔT_{\max}
		Q_{\max}		Q_{\max}		
		T1 (kΩ)	T1 (°C)	T2 (kΩ)	T1 (°C)	°C
P91 / 5v	1000	157,3	15,87	79,6	30,06	14,19
P137-1 / 5v	800	142,3	17,94	87,8	27,95	10,01
P137-1 e 2 / 5v	800	173,8	13,80	70,6	32,70	18,90
P137-1 e 2 P91 / 5v	600	174,8	13,68	70,9	32,60	18,92

Pela Tabela 02 verifica-se que a temperatura mínima (Q_{\max}) da pastilha P91 é atingida ao se aplicar uma corrente elétrica de 1000 mA, correspondendo a 15,87 °C. Para o sistema montado com a pastilha P137-1, sua temperatura mínima, 17,94 °C foi obtida aplicando-se uma corrente elétrica de apenas 800 mA ao sistema. Comparando-se a temperatura mínima alcançada pelas duas pastilhas (P91 e P137-

1), verificou-se que a pastilha P91 atingiu a menor temperatura, sendo observada uma diferença de 2,07 °C entre elas.

Comparando os valores Q_{\max} obtidos com o arranjo (II) e (III), observa-se que há uma diferença de temperatura de apenas 0,12 °C, o que não justifica o dispêndio agregado na configuração (III). Procedendo-se uma análise global entre todos os valores de temperatura obtidos, certifica-se que a configuração (II) foi a que apresentou melhor resultado, alcançando uma temperatura de 13,80 °C com uma corrente elétrica de 800 mA perfazendo um ΔT_{\max} de 18,90 °C.

O ato de acrescentar uma pastilha termoelétrica à pastilha P137–1, obtendo-se a configuração (II) em série no sistema de refrigeração, verifica-se que esta favoreceu uma melhoria na temperatura de -4,14 °C.

Com o intuito de obter temperaturas menores, a tensão aplicada no ventilador foi ampliada de 5 V para 12 V, aumentando a velocidade de rotação do ventilador, e, conseqüentemente, a capacidade de dissipação térmica. Adotando-se o mesmo critério, foi realizada a medida das novas temperaturas. Os resultados obtidos estão representados em um gráfico (Figura 53).

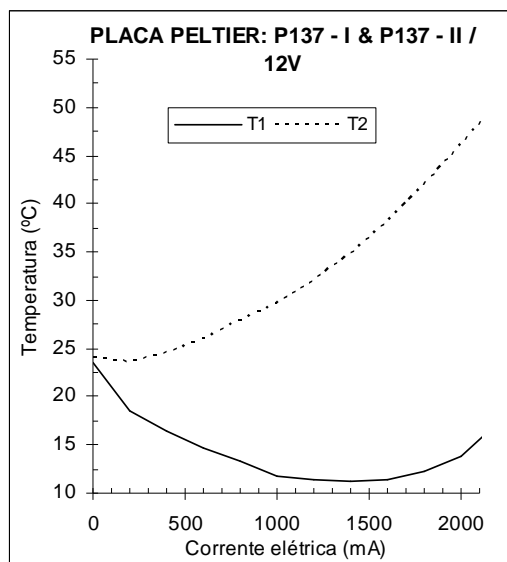


FIGURA 53 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO APLICANDO UMA CARGA ELÉTRICA DE 12 V AO VENTILADOR.

Na Figura 53 observa-se que a menor temperatura atingida, 11,14 °C, ocorreu ao se aplicar uma corrente elétrica de 1400 mA. Comparando-a com a

temperatura obtida e aplicando-se uma carga elétrica de 5 V no ventilador certifica-se que houve um ganho, ou seja, uma diminuição da temperatura de -2,66 °C ao aumentar a velocidade de rotação do ventilador.

Para se obter a diminuição da temperatura, houve a necessidade de aumentar a corrente elétrica aplicada na pastilha termoelétrica em 600 mA, implicando também, um aumento de ΔT_{\max} de 4,81 °C. Sendo assim, adota-se a configuração (II) como a melhor configuração de refrigeração para ser aplicada como sistema de refrigeração para o detector proposto.

Cabe ressaltar que o sistema de refrigeração também foi utilizado no experimento que resultou no artigo intitulado *“Estabilização da temperatura da câmara digital Magi DC575 utilizando pastilha termoelétrica para obtenção dos parâmetros de correção do efeito da corrente escura”*.

4.3 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

Mesmo mantendo a velocidade do ventilador constante e aplicando-se, na pastilha termoelétrica, apenas a corrente elétrica necessária para atingir a temperatura desejada, pode ser necessário variar a intensidade da corrente e/ou tensão aplicada nestes elementos, alterando a velocidade de rotação do ventilador e a capacidade de refrigeração da pastilha termoelétrica, uma vez que a temperatura do sistema sensor pode variar durante a realização de suas atividades.

Nesse sentido, manter a temperatura pré-definida do sistema sensor constante efetuando as operações manualmente é inviável, complexo e cansativo.

Com o objetivo de aperfeiçoar as operações, reduzir o consumo de energia elétrica e, principalmente, de tornar o sistema fácil de ser utilizado, deu-se início à montagem do hardware proposto.

Para montar o hardware, primeiro foi necessário efetuar a distribuição dos elementos na placa de circuito impresso e, em seguida, traçar as trilhas de distribuição de tensão elétrica. Ao término da montagem, obteve-se a seguinte arquitetura para as trilhas do hardware (Figura 54).

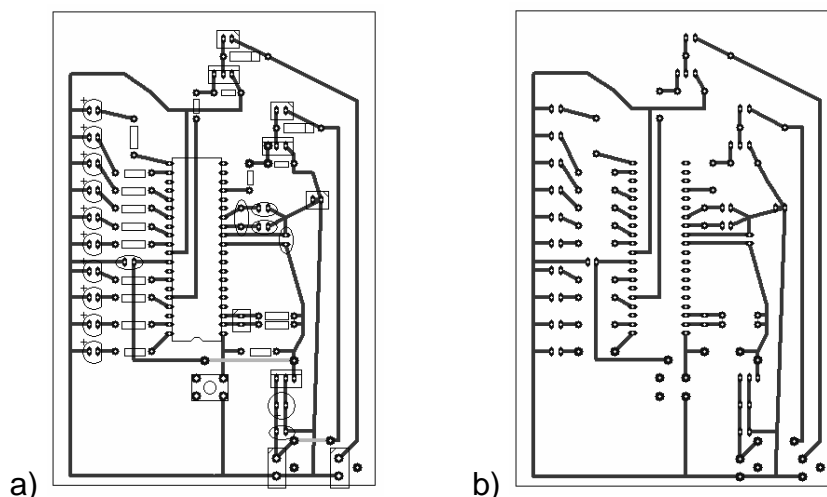


FIGURA 54 – A) DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS ELETRÔNICOS E DESENHO DAS TRILHAS. B) ESBOÇO DAS TRILHAS A SEREM CONFECCIONADAS NA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.

As trilhas na placa de circuito impresso, foram marcadas utilizando-se um marcador para retro projetor. Com as trilhas marcadas, a placa foi mergulhada em uma solução de percloroeto de ferro (FeCl_3) para efetuar a corrosão da parte indesejada, corrosão que levou em torno de 15 a 20 minutos para ocorrer. Concluída a corrosão, obteve-se a placa com as características apresentadas na Figura 55.

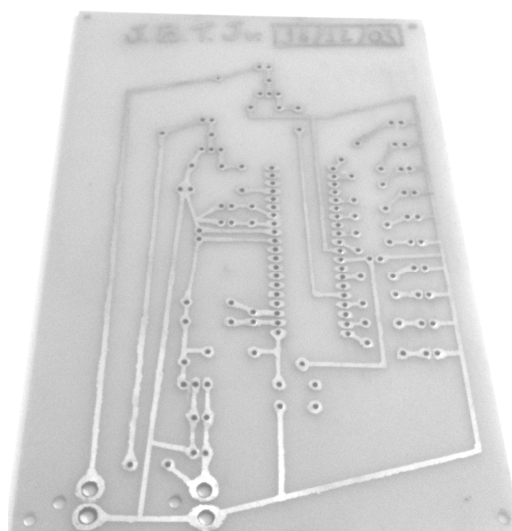


FIGURA 55 – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO APÓS CORROSÃO.

Após a confecção da placa, efetuou-se a soldagem dos elementos eletrônicos na mesma. A Figura 56 apresenta a placa com os elementos soldados.

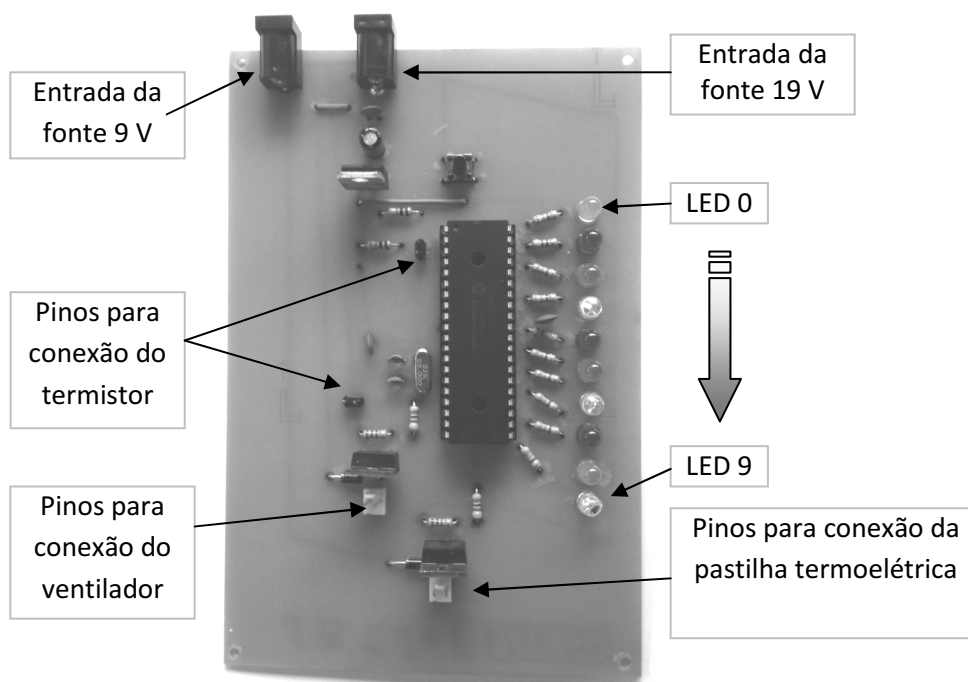


FIGURA 56 – PLACA COM OS ELEMENTOS ELETRÔNICOS SOLDADOS.

Como apresentado na Figura 56, o hardware desenvolvido possui duas entradas de tensão elétrica, sendo uma para a pastilha termoeletrica (9 V) e a outra para o ventilador e funcionamento do sistema operacional (19 V). O hardware também possui dois pinos para conexão de periféricos que, no caso, são o ventilador e a pastilha termoeletrica.

Os LEDs foram utilizados como interface de saída para mostrar o valor digital na base 2, que corresponde à temperatura mensurada pelo termistor. Por exemplo, se a tensão elétrica registrada pelo microcontrolador for transformada no valor digital 500, a interface de saída ficará com os LEDs 2, 4, 5, 6, e 8 ligados e os demais desligados (Tabela 03).

TABELA 03: CONFIGURAÇÃO DA INTERFACE DE SAÍDA PARA O VALOR DIGITAL 500.

Configuração da interface de saída para o valor digital 500										
Posição correspondente (Bits)										
LED	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Ligado										
Desligado										

Após a construção e montagem da placa iniciou-se a segunda etapa, que consistiu na elaboração das rotinas de instruções a serem executadas pelo microcontrolador PIC18F4550.

A implementação das rotinas no MPLAB, primeiramente foi necessário efetuar a configuração do mesmo, indicando qual o microcontrolador utilizado, quais as constantes do microcontrolador a serem empregadas, configuração das portas do PIC18F4550 como entrada ou saída (I/O), indicação do estado das portas: em nível alto - valor 1, em nível baixo - valor 0 e, por fim, inserção das rotinas a serem executadas, sendo estas escritas na linguagem C.

Foram desenvolvidas duas rotinas de instruções para o microcontrolador PIC18F4550, sendo uma para efetuar a leitura da temperatura e executar a interface com os LED's para mostrar qual o valor mensurado, e a outra para efetuar a leitura da temperatura e controlar a tensão entregue ao ventilador e à pastilha termoeletrônica.

A rotina apresentada na Figura 57 é um trecho do código com a finalidade de efetuar a leitura da tensão que representa a temperatura mensurada.

```
OpenADC(ADC_FOSC_16
        &ADC_RIGHT_JUST
        &ADC_2_TAD,
        ADC_CH0
        &ADC_INT_OFF
        &ADC_VREFPLUS_VDD
        &ADC_VREFMINUS_VSS,
        ADC_1ANA);

SetChanADC(ADC_CH0);
Delay10TCYx(5);
```

FIGURA 57: TRECHO DA ROTINA PARA EFETUAR A LEITURA DO CANAL ANALÓGICO.

Após a implementação dos comandos de leitura do canal de entrada analógica, foi necessário instruir o microcontrolador o que ele deveria fazer com o valor mensurado que, no caso, foi efetuar a transformação Analógico/Digital (A/D), para tanto, foi implementado o seguinte trecho de instruções (Figura 58).

```
while(1)
{
    ConvertADC();
    while(BusyADC());
    in=ReadADC();
}
```

FIGURA 58: INSTRUÇÕES IMPLEMENTADA PARA A TRANSFORMAÇÃO ANALÓGICO/DIGITAL.

As rotinas a que se faz referência são utilizadas nos dois *firmware* desenvolvidos, seguindo as instruções mencionadas:

a) *Instruções em Linguagem C para a interface de saída constituída com LEDs.*

Findo o processo de leitura e conversão A/D, foi inserido o código que realizou a transformação do valor digital da base 10 para a base 2 e, em seguida, enviou-se instruções para cada LED, informando, se o mesmo deveria ser ligado ou manter-se desligado. O trecho do código que executou a operação é mostrado na Figura 59.

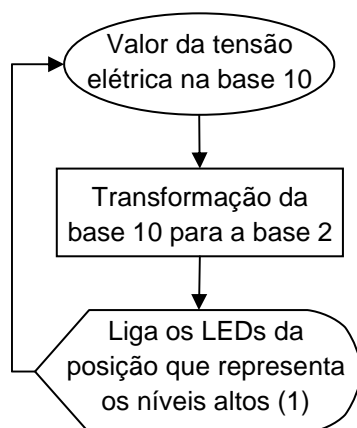


FIGURA 59: CÓDIGO DE TRANSFORMAÇÃO DO VALOR DA BASE 10 PARA A BASE 2.

O trecho de código da Figura 59 foi executado para cada valor digital que representa a temperatura lida pelo microcontrolador, transformando o valor da base 10 para a base 2. À medida que ocorriam as transformações, os valores obtidos eram armazenados em uma matriz, na qual cada elemento correspondia a um bit.

Cada elemento da matriz representaria um bit, e cada bit foi associado a uma porta de saída. Ao final, com a leitura do conjunto, obteve-se o valor correspondente à tensão elétrica lida pelo microcontrolador PIC18F4550 que representou a temperatura do detector.

Para se obter a quantidade de tensão elétrica que o microcontrolador mensurou, foi necessário que o usuário transformasse os valores obtidos na base 2 para a base 10 e, em seguida, convertesse o valor em tensão elétrica.

Com a configuração utilizada, o microcontrolador foi capaz de detectar uma variação de 4,887585 mV, ou seja, a tensão necessária para deslocar um valor digital, obtido pela expressão (Equação 01):

$$V_{\text{lbit}} = \frac{5000\text{mV}}{2^n - 1} = 4,887585\text{mV} \quad \text{Equação 01}$$

Na qual n é o número de bits do conversor.

Assim, o valor 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 na base 2, que corresponde ao valor 500 na base 10, equivale a uma tensão de aproximadamente 2444 mV ($V_{500} = 500 * 4,887585\text{mV} = 2.443,8\text{mV}$).

A temperatura mensurada é dada em tensão elétrica, em voltagem, e não em graus Celsius. Para se obter a temperatura em graus Celsius, foi necessário verificar qual a temperatura que este valor representaria. Os coeficientes empregados para efetuar a transformação foram obtidos com a calibração do termistor acoplado ao hardware.

b) Instruções em Linguagem C para o controle de energia elétrica entregue ao ventilador e pastilha termoelétrica.

Após efetuar as rotinas de leitura da tensão elétrica e conversão A/D da tensão aplicada ao termistor, foi gravado no microcontrolador um código o qual permitiu que o mesmo optasse pela execução de uma das seguintes operações no funcionamento do sistema:

1) Aplicar a tensão elétrica máxima disponível ao ventilador e acionar a pastilha termoelétrica.

2) Desligar o ventilador e a pastilha termoeletrica.

3) Aumentar ou diminuir a tensão elétrica aplicada ao ventilador e manter a pastilha termoeletrica desligada.

A primeira opção foi executada quando o valor da tensão elétrica medida pelo microcontrolador era menor ou igual a 609. Este valor corresponde a uma temperatura $\geq 20,25$ °C, que é o valor limite para o acionamento do ventilador e da pastilha termoeletrica, refrigerando o sistema. A execução da segunda opção ocorria quando a tensão elétrica mensurada era maior ou igual a 615. Neste caso a temperatura $\leq 19,75$ °C, e houve o desligamento do ventilador e da pastilha termoeletrica.

Quando o valor mensurado pelo microcontrolador estava entre 609 e 615, era executada a terceira opção. A tensão elétrica medida, comparada ao valor obtido anteriormente, verificando se o valor era maior e/ou menor. Caso o valor fosse maior, diminua a energia elétrica aplicada no ventilador, por outro lado, se fosse menor, aumentava a energia elétrica aplicada no ventilador. Para valor igual ao anterior, a quantidade de energia aplicada no ventilador era mantida.

Cabe ressaltar que os valores apresentados foram obtidos após a calibração do termistor de 10 k Ω acoplado ao hardware.

4.4 CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR ACOPLADO AO HARDWARE

A calibração do termistor de 10 k Ω acoplado ao hardware (Figura 60), utilizou-se como referência o termistor de 200 k Ω , calibrado referente ao PolyScience Modelo 9112, conectado a um multímetro configurado em seu módulo ohmímetro (Figura 60).

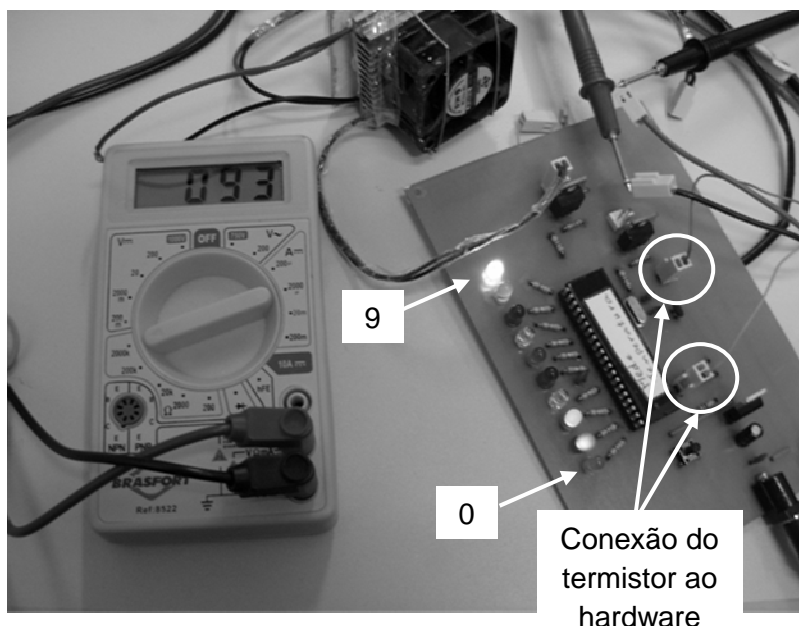


FIGURA 60 – ACLOPAMENTO DO TERMISTOR DE 200 K Ω AO MULTÍMETRO E O DE 10 K Ω AO HARDWARE.

Ambos os termistores foram postos em contato com a pastilha termoelétrica, dando início ao procedimento de calibração. Os valores de resistência mensurados com o termistor de 200 k Ω ligado ao multímetro foram aplicados na Equação 06, obtendo-se a temperatura em graus Celsius.

Já os valores obtidos na calibração do termistor de 10 k Ω foram convertidos da base 2 para a base 10. Estes valores foram plotados em um gráfico (Figura 61), em que a abscissa representa o valor digital da tensão elétrica mensurada com o sensor acoplado ao hardware e a ordenada representa a temperatura equivalente em graus Celsius.

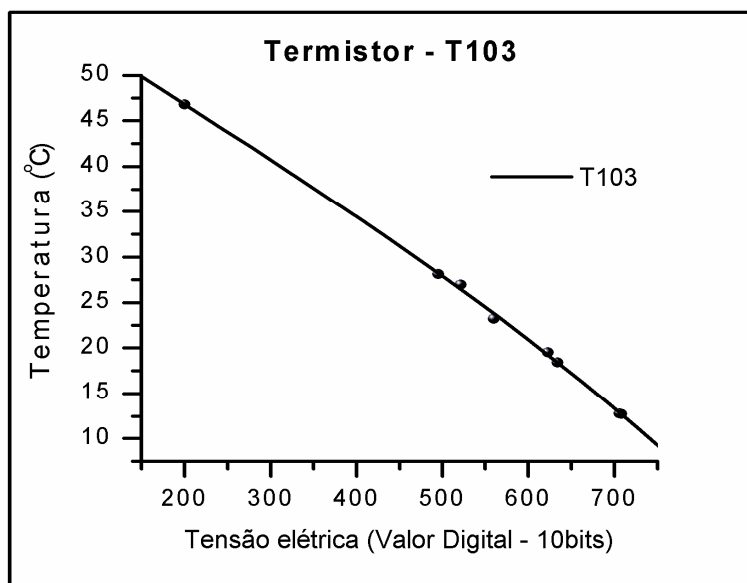


FIGURA 61 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR DE 10 KΩ ACOPLADO AO HARDWARE.

A expressão matemática que melhor ajustou a curva de calibração é apresentada pela Equação 07.

$$T = A + B1 * VD + B2 * VD^2 + B3 * VD^3 \quad \text{Equação 07}$$

Em que:

$T \Rightarrow$ A temperatura correspondente à tensão elétrica mensurada em graus Celsius;

$VD \Rightarrow$ O valor digital na base 10 que representa a tensão elétrica mensurada;

$A, B1, B2$ e $B3 \Rightarrow$ Os coeficientes ajustados, cujos valores estão apresentados na Tabela 04.

TABELA 04: VALORES DOS COEFICIENTES AJUSTADOS PARA A EQUAÇÃO 07.

Termistor	Coeficientes ajustados			
	A (°C)	B1 (°C)	B2 (°C)	B3 (°C)
T103	59,20565	-0,06415	$1,5682 \times 10^{-5}$	$-2,52365 \times 10^{-8}$
Erro	6,41021	0,05233	$1,20199 \times 10^{-4}$	$8,38427 \times 10^{-8}$
$R^2 = 0,99923$				

Como se pode observar, a expressão que melhor ajustou os valores obtidos com o termistor acoplado ao hardware não é do tipo exponencial conforme a calibração do termistor calibrado referente ao PolyScience Modelo 9112, o que ressalta a importância de se efetuar a calibração do termistor.

A Equação 07 demonstrou que o hardware desenvolvido foi capaz de detectar uma variação de temperatura de 0,07 °C, o que amplia o campo de possibilidades de sua aplicação.

Cabe ressaltar que o microcontrolador PIC18F4550 suporta 13 termistores em um único encapsulamento, o que possibilita monitorar a temperatura de até 13 pontos distintos.

4.5 FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE REM

A Figura 62 apresenta o mecanismo obtido para fixar a lente coletora de REM. Sua concepção se deu pelo acoplamento de tubo e conectores de PVC de bolsa e rosca de 50 mm.



FIGURA 62 – SISTEMA PARA FIXAÇÃO DA LENTE COLETORA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA AO PROTÓTIPO.

No lado direito da peça (Figura 62) o conector de PVC está com a bolsa livre para o encaixe da lente coletora de REM.

Na extremidade esquerda (Figura 62) a rosca do conector de PCV foi utilizada para acoplar o conjunto ao protótipo.

4.6 FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMI-TRANSPARENTE

Após fixar a lente coletora, iniciou-se o desenvolvimento do suporte para atar o espelho semitransparente na base (Figura 63).

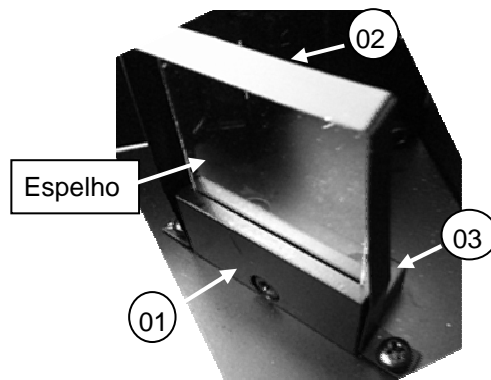


FIGURA 63 – MECANISMO PARA FIXAÇÃO DO ESPELHO SEMI-TRANSPARENTE AO PROTÓTIPO.

O suporte desenvolvido foi composto de três peças: base de sustentação do espelho (01), presilha para prender o espelho (02) e suporte para prender o conjunto na base (03).

4.7 FIXAÇÃO DA WEBCAM RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO

O mecanismo construído de fixação da WebCam está apresentado na Figura 64.

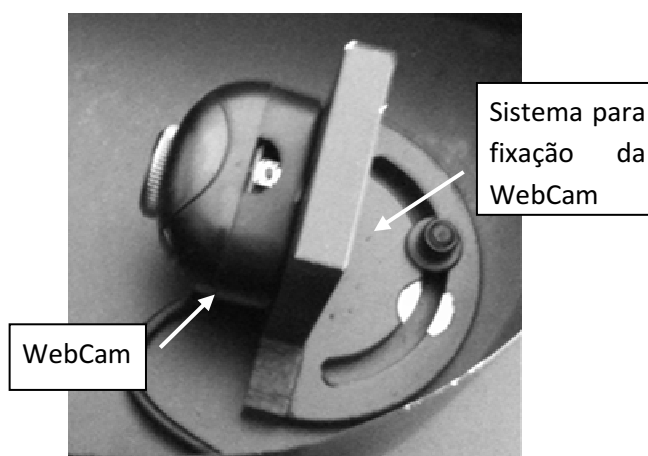


FIGURA 64 – SISTEMA PARA FIXAÇÃO DO DETECTOR RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DA IMAGEM DO OBJETO EM ESTUDO.

A câmara foi acoplada numa placa que continha um bilombo circular, o qual possibilitou efetuar movimentos no eixo x, y, z e giro em torno do eixo y, sendo úteis para efetuar o alinhamento da WebCam.

4.8 FIXAÇÃO DA FENDA DE ENTRADA DE REM

A fenda de abertura para entrada de REM foi constituída com o emprego de quatro lâminas de barbear, sendo estas coladas com superbonder em uma placa de circuito impresso.

A fenda foi fixada na base de acoplamento com o auxílio de um suporte que garantiram a sua verticalidade (Figura 65).

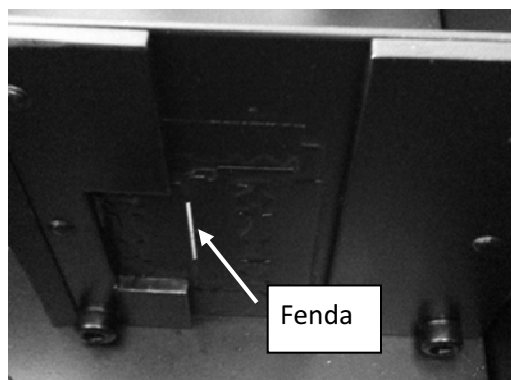


FIGURA 65 – FENDA DE ENTRADA DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

4.9 FIXAÇÃO DA REDE DE DIFRAÇÃO

A fixação da rede de difração na base foi realizada com o mecanismo apresentado na Figura 66. Com este sistema foi possível efetuar movimentos para alterar o ângulo de incidência do fluxo de REM sobre a rede de difração.



FIGURA 66 – MECANISMO PARA FIXAR A REDE DE DIFRAÇÃO AO PROTÓTIPO.

4.10 FIXAÇÃO DA LENTE DE FOCALIZAÇÃO DO FLUXO DE REM DIFRATADO NO DETECTOR

A Figura 67 apresenta a estrutura desenvolvida para fixar a lente responsável pela coleta do fluxo de REM difratado e focalizá-lo no detector acoplado ao sistema de refrigeração.

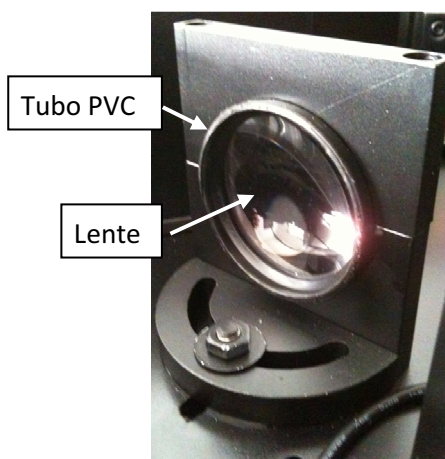


FIGURA 67 – MECANISMO PARA ACOPLAR A LENTE DE FOCALIZAÇÃO DO FLUXO DE REM DIFRATADO NO DETECTOR.

Para evitar que a borda da lente fosse danificada pelo atrito da mesma com o material utilizado na construção do seu suporte, utilizou-se um tubo de PVC para efetuar a conexão da lente.

4.11 FIXAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E DO DETECTOR DO FLUXO DE REM DIFRATADO

O sistema de refrigeração e a estrutura de fixação do detector que registra o fluxo de REM difratado são apresentados na Figura 68.

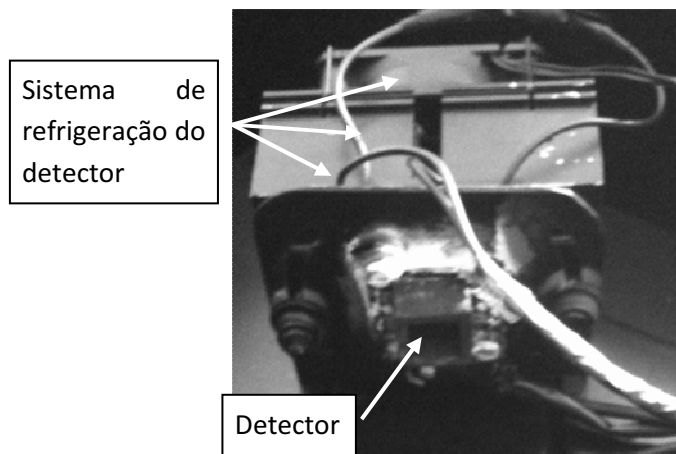


FIGURA 68 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E FIXAÇÃO DO DETECTOR QUE REGISTRA O FLUXO DE REM DIFRATADO.

O fluxo de radiação refratado foi registrado utilizando-se o detector de uma WebCam, modelo DotStore. Para tanto foram removidas a sua lente e a estrutura que protege o seu hardware. Este procedimento foi adotado com o objetivo de reduzir os efeitos das aberrações do sistema óptico.

4.12 ELEMENTOS ACOPLADOS NA BASE DO PROTÓTIPO

A Figura 69 apresenta o conjunto dos componentes fixados na base de acoplamento, sendo: a Base (01), Local para fixação da lente coletora de REM (02), Espelho semi-transparente (03), Detector responsável pelo registro da imagem do objeto (04), Fenda de entrada de REM (05), Rede de difração (06), Lente para focalização do fluxo de REM difratado no detector (07), Sistema de refrigeração e fixação do detector do fluxo de REM (08) e Hardware para controle do sistema de refrigeração (09).

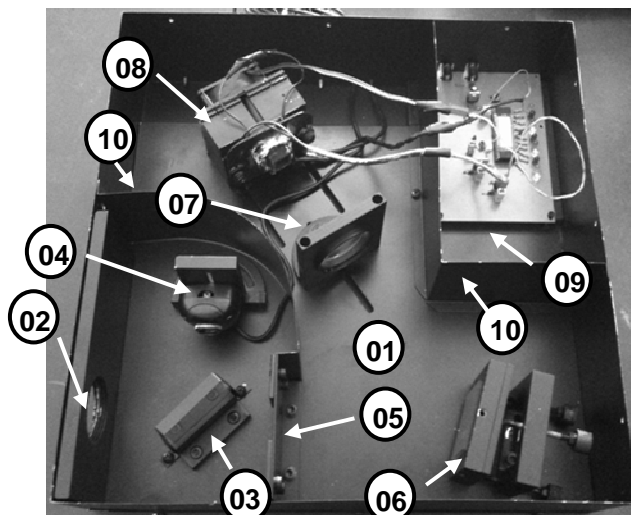


FIGURA 69 – VISTA INTERNA DO PROTÓTIPO.

A eliminação dos sinais espúrios oriundos da reflexão interna foi resolvida com a confecção de divisórias internas (10), as quais possibilitaram isolar os caminhos que o fluxo de REM percorre dentro do protótipo.

Todo conjunto, após sua montagem, foi acondicionado em uma caixa confeccionada com chapa de zinco e pintada em preto fosco (Figura 70). Este procedimento foi adotado com a finalidade de reduzir a reflectância resultante da interação do fluxo de REM com os elementos que o constituem.

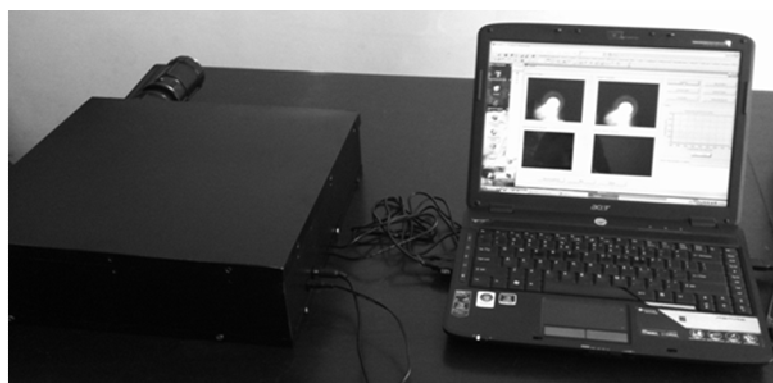


FIGURA 70 – VISTA DO PROTÓTIPO.

4.13 APLICATIVO DE INTERFACE E PROCESSAMENTO DE DADOS

A elaboração do aplicativo de interface e processamento dos dados obtidos, foi realizada utilizando o compilador Borland Delphi.

O *layout* do aplicativo desenvolvido é apresentado na Figura 71.

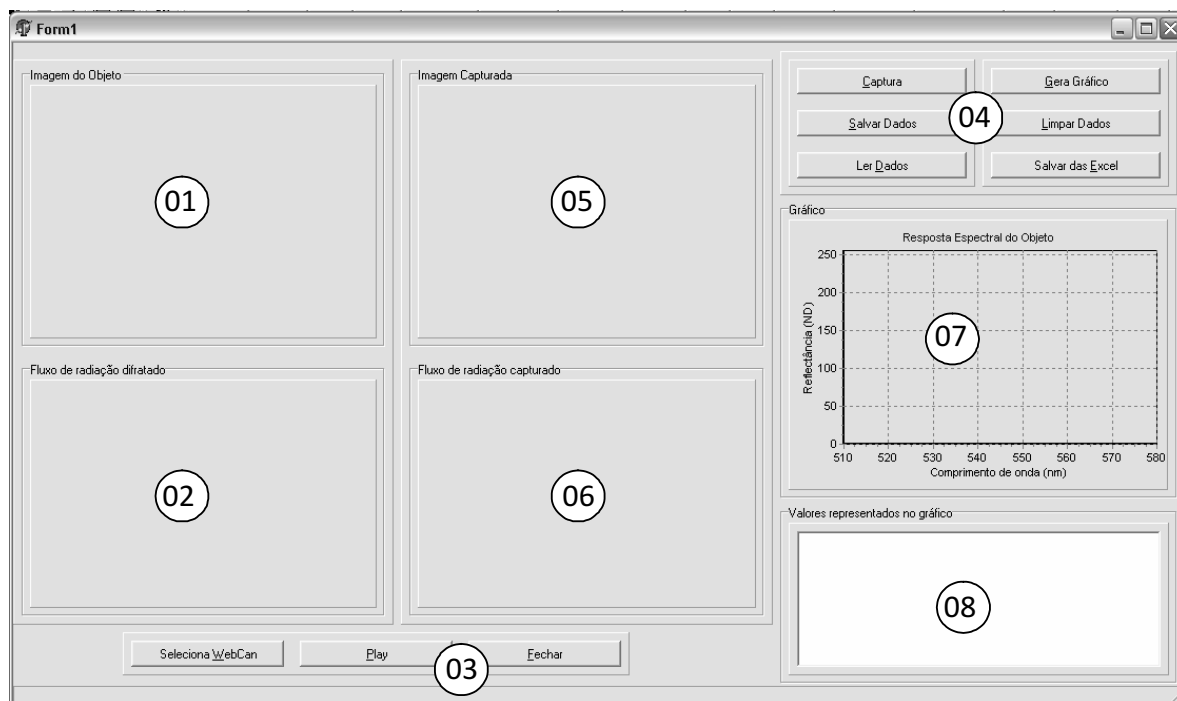


FIGURA 71 – ARQUITETURA DO APLICATIVO DE PROCESSAMENTO E VISUALIZAÇÃO DOS DADOS.

Na Figura 71 é mostrada a arquitetura do aplicativo utilizado no processamento: *Display* de visualização da imagem do objeto (01), *Display* de visualização do fluxo de REM difratado (02), Botões de acionamento do programa (seleção das WebCam, inicialização e finalização) (03), Botões de comando das operações de registro e processamento dos dados (Capturar, Salvar Dados, Ler Dados, Gerar Gráfico, Limpar Dados) (04), *Display* de visualização estática da imagem do objeto (05), *Display* de visualização estática do fluxo de REM difratado (06), Gráfico da resposta espectral do objeto (07), Visualização dos valores plotados no gráfico (08).

O botão “Selecionar WebCam” possibilita selecionar os detectores. Ao acionar o botão “Play”, inicializa-se o sistema de operação. A área mostrada no campo 01 (*Display* 01) apresenta a imagem do objeto. No campo 02 (*Display* 02) apresenta-se a imagem do fluxo de REM difratado (Figura 72).

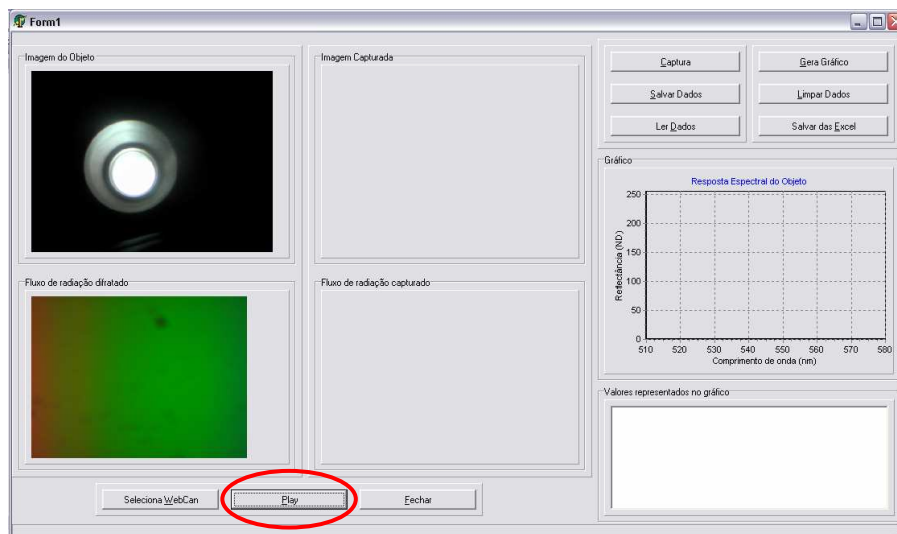


FIGURA 72 – VISUALIZAÇÃO DA ÁREA QUE PREENCHE O CAMPO DE VISADA DO PROTÓTIPO E DO FLUXO DE REM DIFRATADO.

Ao acionar o botão “Captura” os dados apresentados no *display* 01 e 02, são transferidos para o *display* 05 e 06 (Figura 73).

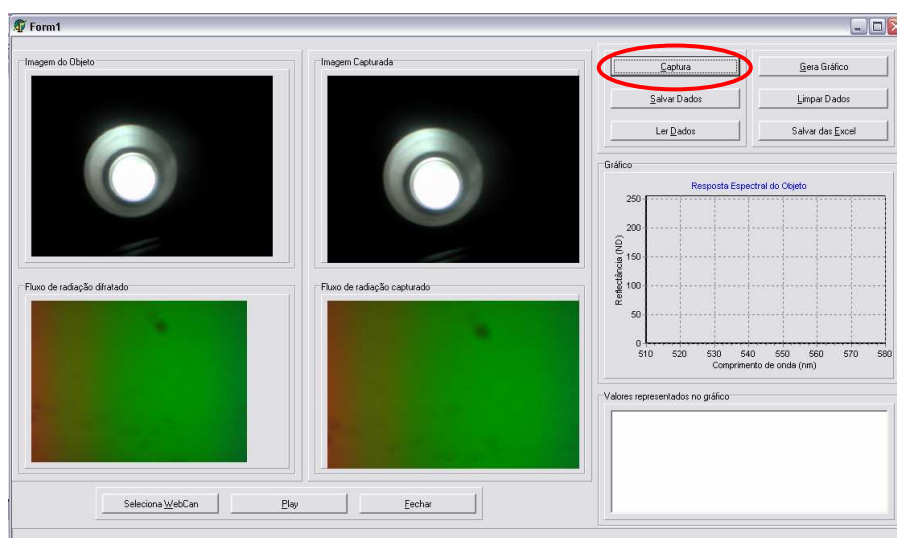


FIGURA 73 – VISUALIZAÇÃO DOS DADOS NOS DISPLAY DE VISUALIZAÇÃO ESTÁTICA.

Após serem transferidos para os *campos* de visualização estática, efetuou-se a correção do efeito da corrente escura e dos pontos *blemishes*. Para tanto, foi necessário acionar o botão “Ler Dados”. Também nesta operação realiza-se a separação das faixas espectrais e calculam-se os valores plotados no gráfico

apresentado no campo 08 (Figura 74) que, para ser mostrado, foi necessário acionar o botão “Gerar gráfico”.

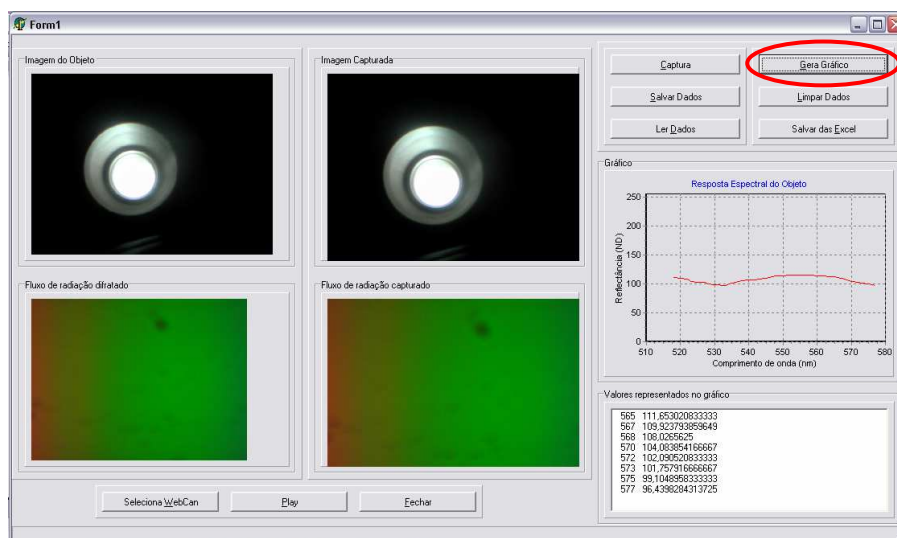


FIGURA 74 – VISUALIZAÇÃO DO GRÁFICO.

Pode-se, após todo o processamento, salvar ou não os dados, acionando-se os botões correspondentes “Salvar Dados” ou “Limpar Dados”.

4.14 OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CORREÇÃO DA CORRENTE ESCURA E IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS *BLEMISHES* DO DETECTOR RESPONSÁVEL PELO REGISTRO DO FLUXO DE REM DIFRATADO

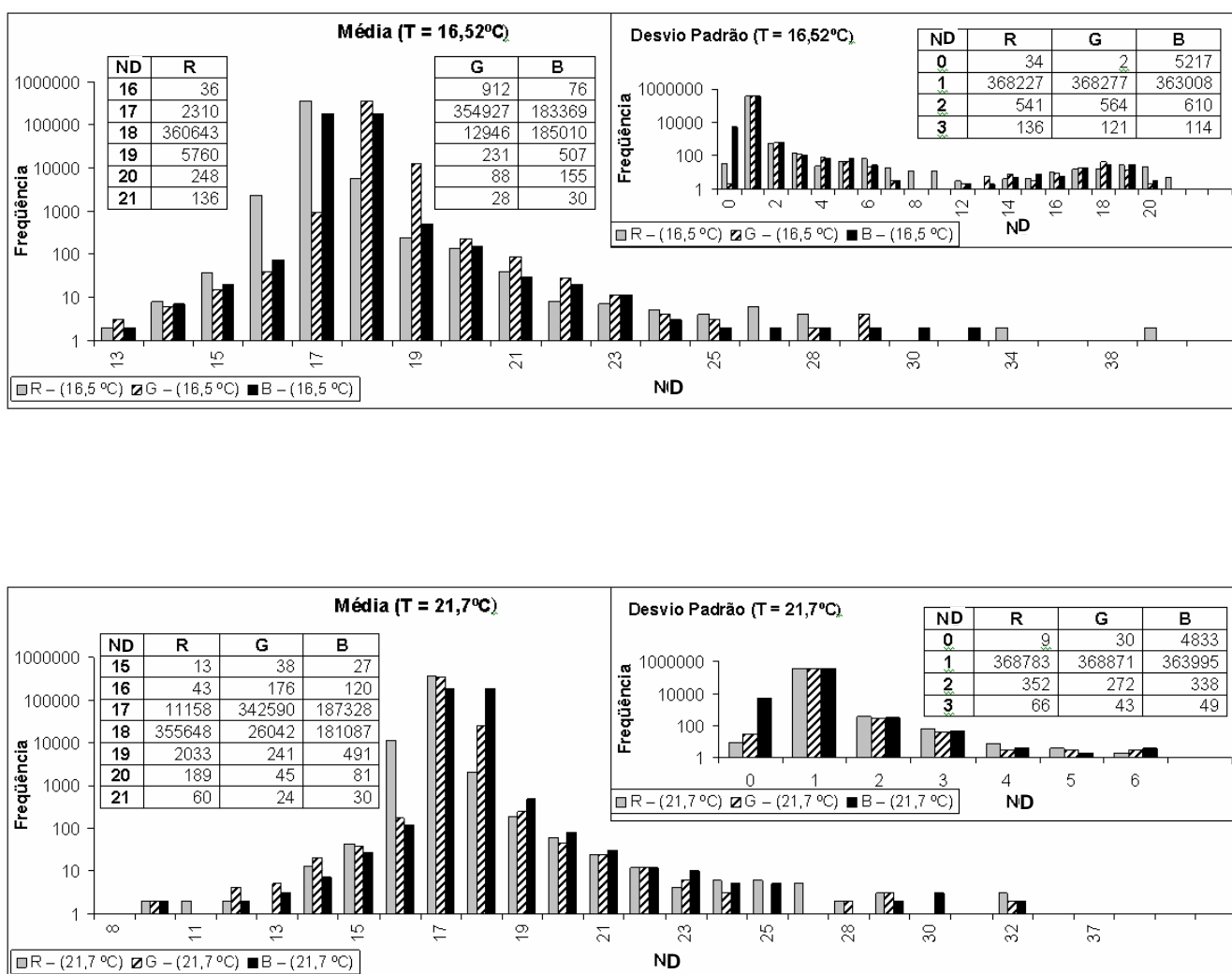
Uma imagem pode ser entendida como uma matriz de n linhas por m colunas, onde cada elemento desta matriz equivale a um pixel da imagem. Considerando-se esta matriz como uma pequena superfície (CCD), cada elemento representa um cubo constituído com material capaz de transformar um fluxo de REM em carga elétrica.

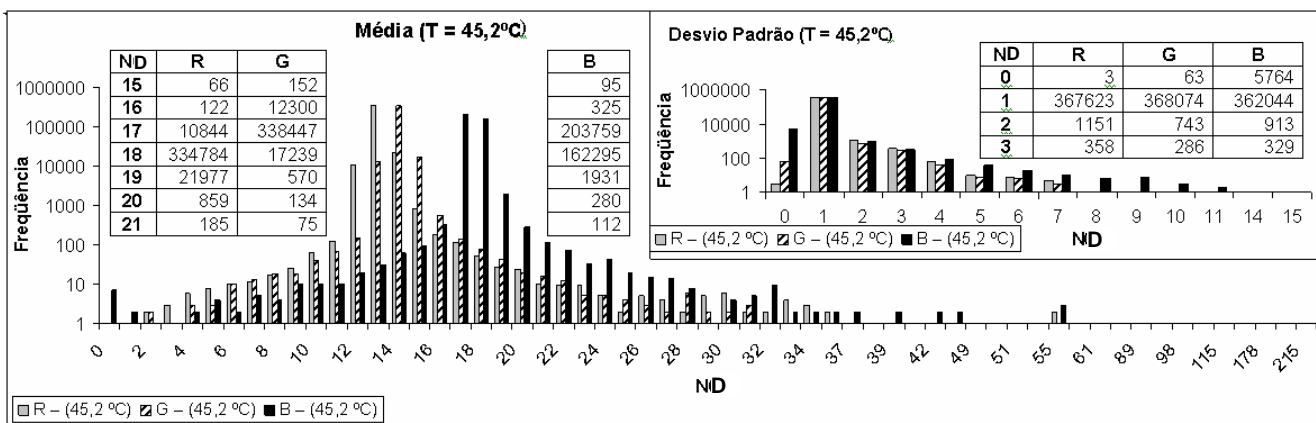
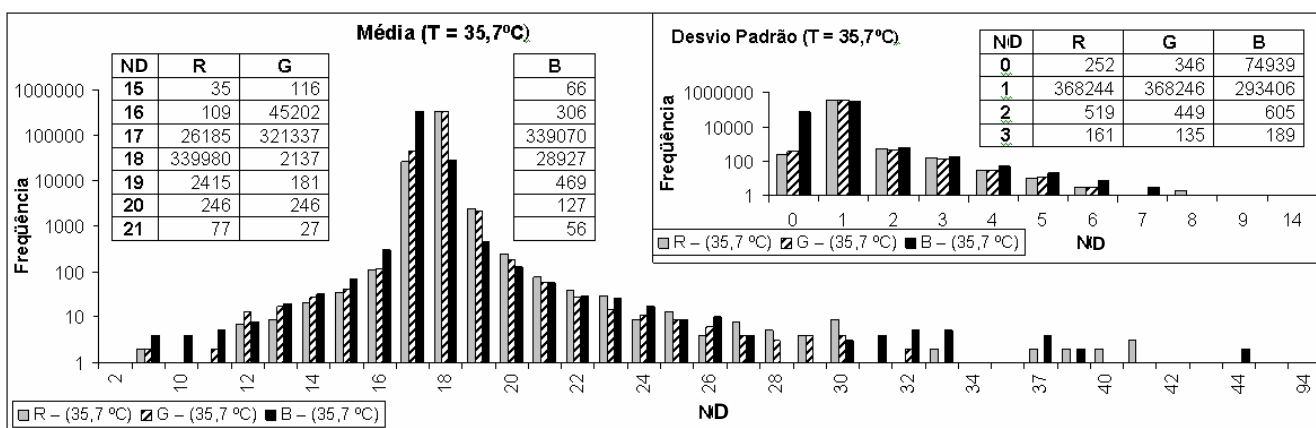
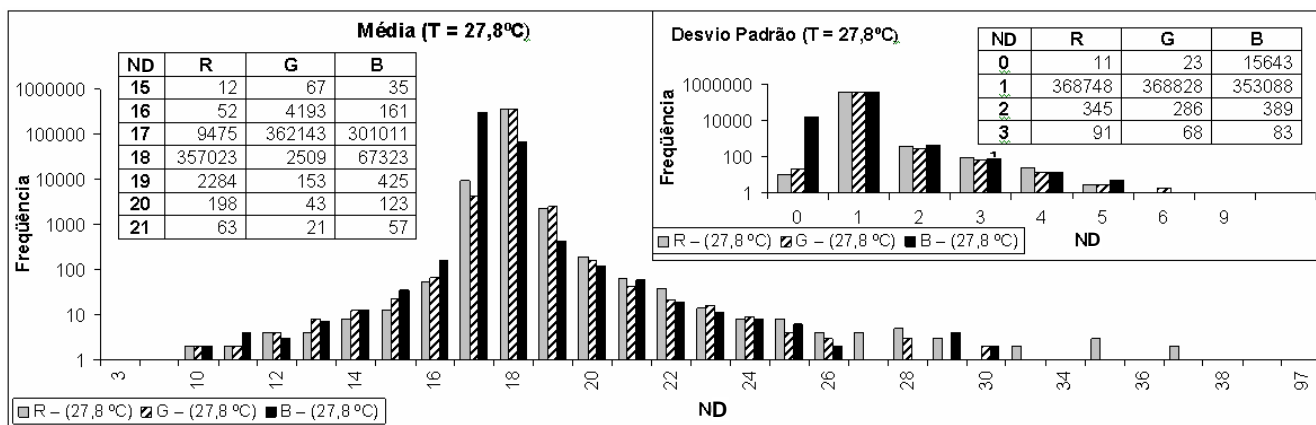
A quantidade de carga elétrica gerada em cada elemento é proporcional à intensidade do fluxo de REM incidido. Para armazenar a carga elétrica gerada nos elemento (pixels) desta matriz, ela é convertida em um valor digital, sendo este expresso em ND (Número Digital). Mais detalhes no item 2.6.

Parte da carga elétrica gerada em cada elemento resulta do efeito da corrente escura, ou seja, da agitação térmica dos elétrons do material que constitui o

detector, sendo produzida continuamente em taxas proporcionais à temperatura absoluta do dispositivo.

Para demonstrar a quantidade de carga gerada no detector em função da temperatura, há que se apresentar os resultados obtidos na realização do artigo intitulado “*Estabilização da temperatura da câmara digital Magi DC575 utilizando pastilha termoeletrica para obtenção dos parâmetros de correção do efeito da corrente escura*”. Neste artigo foi registrada a quantidade de carga gerada, representada em ND, com a temperatura do detector a 16,52 °C; 21,7 °C; 27,8 °C; 35,7 °C; 45,2 °C e 54,8 °C. Os resultados obtidos foram apresentados na Figura 75.





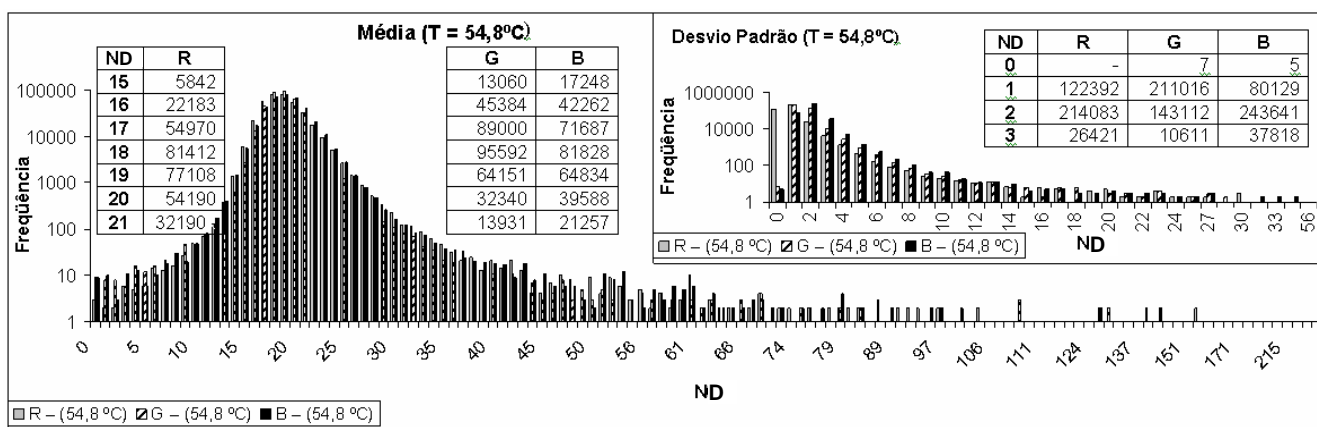


FIGURA 75 – FREQUÊNCIA DE VALORES MÉDIO DE ND E DE SEUS RESPECTIVOS DESVIO PADRÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS.

FONTE: Tavares Jr. et al (2010).

Os gráficos apresentados na Figura 75 expressam os valores do ND médios da banda azul, verde e vermelha de cada pixel da imagem. Nesta mesma figura, também há uma tabela cujos valores correspondem aos ND médio do centro da curva e a sua respectiva frequência na imagem. Já no canto superior direito de cada gráfico há um segundo gráfico e uma segunda tabela com informações sobre a frequência em que um determinado desvio padrão aparece na imagem.

Pela análise dos gráficos de frequência de ND médio, expressos na Figura 75, foram extraídos os valores apresentados na Tabela 05.

TABELA 05: VALORES DO ND MÉDIO E DE DESVIO PADRÃO QUE APARECERAM COM MAIOR FREQUÊNCIA.

Grupo	Temperatura (°C)	Número Digital (ND) da Banda								
		R _{máx}	R _{med}	σ_R	G _{máx}	G _{med}	σ_G	B _{máx}	B _{med}	σ_B
G-I	16,52	43	18	1	37	17	1	38	17/18	1
G-II	21,72	47	18	1	46	17	1	46	17/18	1
G-III	27,83	97	18	1	96	17	1	96	17	1
G-IV	35,73	95	18	1	94	17	1	94	17	1
G-V	45,18	99	18	1	99	17	1	215	17/18	1
G-VI	54,84	243	19	2	222	18/19	2	237	18/19	2

FONTE: Tavares Jr. et al (2010).

Analisando os valores apresentados na Tabela 05, foi verificado que somente a 54,84 °C ocorreu variação do ND gerada pela corrente escura, ou seja, somente após uma variação de 38,32 °C na temperatura ocorreu um acréscimo de uma unidade no valor do ND gerado pela corrente escura, o que não deveria ocorrer pois, segundo Beynon e Lamb (1980), a geração de corrente escura sofre uma variação de fator 2 a cada 10 °C de alteração na temperatura.

Analisando-se os valores do $ND_{m\acute{a}x}$, verificou-se que, quando há uma variação de temperatura em torno de 10 °C, a diferença entre o $ND_{m\acute{a}x}$ atinge um fator de aproximadamente 2 conforme retratado por Beynon e Lamb (1980). Isto indicou que, ao variar a temperatura do detector, também ocorreu variação na taxa de geração de corrente escura, que foi mascarada devido ao “*fat zero*”.

Fat zero é uma técnica utilizada para reduzir o efeito da perda de carga durante sua transferência, sendo muito eficiente na redução da perda na armadilha (em Inglês: *trapping loss*), não podendo eliminá-la completamente devido ao efeito das bordas (em Inglês: *edge effect*). Este efeito é causado devido ao fato de pacotes de cargas de tamanhos diferentes ocuparem áreas de tamanhos diferentes. O valor do *fat zero* a ser utilizado pode ser determinado pela diferença entre a carga de entrada e a carga de saída (CARNES e KOSONOCKY, 1972; BRODERSEN et al., 1975; BEYNON e LAMB, 1980).

Pela Tabela 05 verificou-se que em todos os experimentos o desvio padrão do $ND_{méd}$ foi de uma unidade. De posse desta informação, ao analisar os gráficos apresentados na Figura 75, certificou-se que, no lado direito do gráfico, ocorre um prolongamento da cauda da curva de distribuição normal. Estes valores indicaram que há pixels com valores cujo erro não permite que o mesmo faça parte da medida, sendo estes pixels considerados pontos *blemishes*.

Os pixels considerados pontos *blemishes* necessitam de tratamento diferenciado dos demais, pois, até mesmo utilizando o *fat zero*, o seu valor não se aproximou do valor médio do ND da imagem. Este efeito ocorre devido a falhas na fabricação do detector ou deficiência na tecnologia do dispositivo.

Para se obter os coeficientes de correção da corrente escura e identificar os pontos *blemishes* do detector utilizado para registrar a intensidade do fluxo de radiação difratado foram coletadas 30 imagens em ambiente escuro. Para tanto, o

detector foi refrigerado e sua temperatura mantida a $20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com os valores registrados foram calculados a média e o desvio padrão do NC armazenado em cada pixel das bandas azul, verde e vermelho. Obteve-se como resultado uma imagem com o valor médio de cada pixel e outra com desvio padrão.

Como o valor do ND médio, que representa o efeito da corrente escura, está próximo a zero torna-se impossível a distinção pelo olho humano em função das pequenas variações de intensidade dos valores armazenados. Para visualizar as diferenças dos valores do ND médios, foi aplicada a técnica de contraste, que aumentou a amplitude das variações dos níveis de cinza da imagem. Como resultado, foi obtida a imagem apresentada na Figura 76.

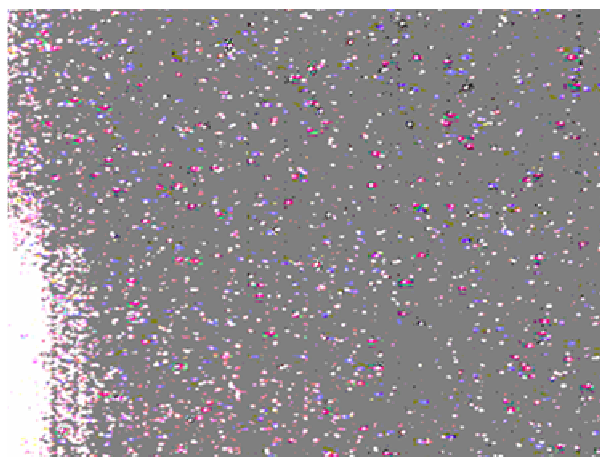


FIGURA 76 – MAPA DA CORRENTE ESCURA APÓS APLICAR A TÉCNICA DE CONTRASTE DE IMAGEM.

Pela análise visual da Figura 76, verificou que os pixels do canto inferior do lado esquerdo registram os maiores valores médios do ND, quando comparados com os demais. Isto ocorre devido ao fato de a geração de corrente escura tender a ser não-uniforme sobre todo o dispositivo, havendo pontos ou áreas fixas com taxa de geração de corrente escura diferenciada dos demais elementos, sendo este efeito denominado pontos *blemishes* (BEYNON e LAMB, 1980; SHORTIS e BEYER, 1996).

Para verificar a probabilidade de ocorrência e identificação de pontos *blemishes* foi calculada a frequência com que cada valor médio do ND e do seu respectivo desvio padrão ocorrem na imagem. Os resultados obtidos foram plotados em um gráfico, cujo eixo da abscissa representa os valores médios, e o eixo da

ordenada indica a frequência com que os níveis de cinza aparecem na imagem. O mesmo procedimento foi aplicado nos dados de desvio padrão. Os resultados obtidos foram apresentados na Figura 77.

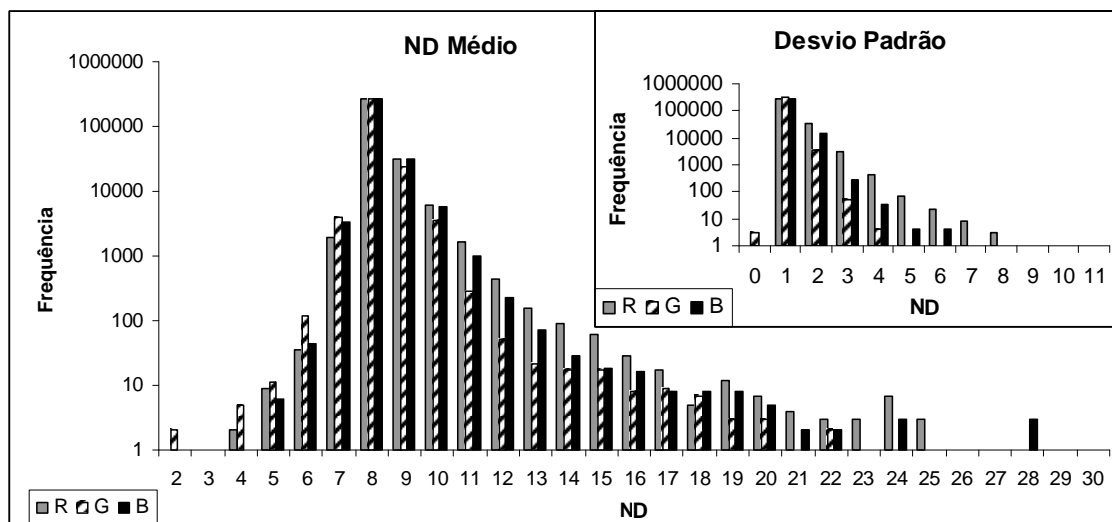


FIGURA 77 – FREQUÊNCIA DE VALORES MÉDIO DO ND E DE SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO PARA O DETECTOR DO FLUXO DE REM DIFRATADO.

Pela Figura 77, o valor médio encontrado para o ND foi igual a 8 sendo aquele de maior frequência na banda R, G e B; para o desvio padrão o valor ND igual a 1 foi o de maior frequência.

O detector empregado para registrar a intensidade do fluxo de REM difratado produz uma imagem com 640 colunas e 480 linhas, totalizando 307200 pixels. Sendo assim, foram obtidos 307200 valores do ND médios. O gráfico apresentado na Figura 80 esboça a frequência com que cada um destes valores ocorreu. Apresentando distribuição normal, também constatou-se que há um prolongamento da cauda para o lado direito do gráfico indicando a presença de pontos *blemishes*.

Para identificar os pontos *blemishes*, efetuou-se o cálculo do valor médio das médias e o seu respectivo desvio padrão. Como resultado obteve-se o valor do ND igual a 8 para o valor médio e um valor do ND igual a 1 para o desvio padrão.

Em seguida, efetuou-se a identificação dos pontos *blemishes*, nos quais se considerou que todo ND superior a 11 ($ND = 8 + 2,5 * 1 \approx 11$) são ponto *blemishes*, ou

seja, todos os pixels que registraram valor médio fora do intervalo de aceitação foram considerados pontos *blemishes*.

Ao se aplicar a condição de identificação dos pontos *blemishes* na imagem que contém os valores médios da banda R, G e B, os pontos *blemishes* foram indicados em branco e os não-*blemishes* em preto (Figura 78).

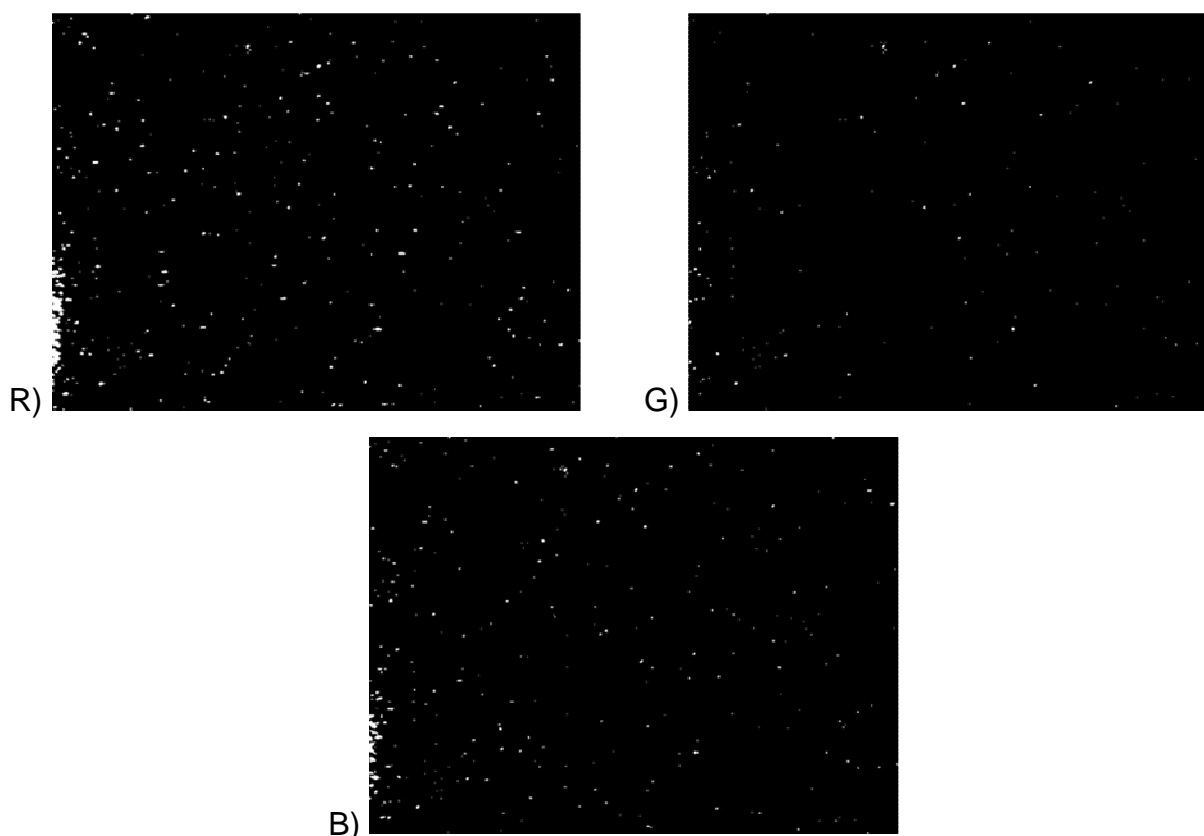


FIGURA 78 – IMAGENS DOS PONTOS BLEMISHES NAS BANDAS RGB.

Pelos resultados, pode verificar que a banda vermelho (R) foi a que apresentou maior número de pontos *blemishes*, e a banda do verde (G) a que apresentou o menor. Sendo assim, a banda do vermelho foi a que apresentou maior número de pixels com defeitos de fabricação. Para melhor visualizar os resultados, foi efetuada a composição de bandas, atribuindo cada uma ao seu respectivo canal. O resultado é apresentado na Figura 79.

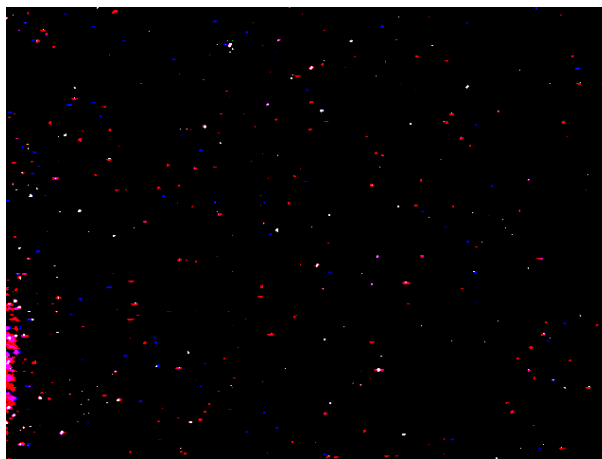


FIGURA 79 – COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PONTOS BLEMISHES.

4.15 IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS QUE DEFINEM AS BANDAS ESPECTRAIS

Por desconhecer as dimensões da área efetivamente ativa do detector da WebCam empregada para registrar o fluxo de REM difratado, foi utilizada uma fonte de luz branca (Figura 80) para verificar se a imagem de todo o espectro do visível formada pela lente atinge a área efetivamente ativa do detector.

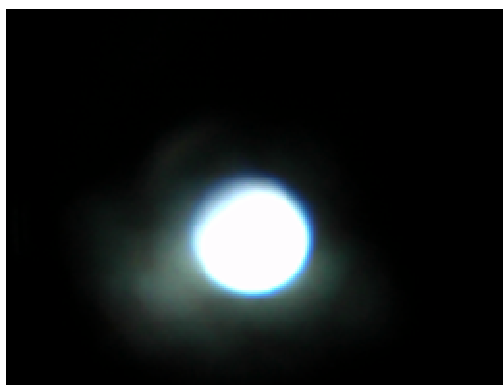


FIGURA 80 – IMAGEM DA FONTE DE LUZ BRANCA OBTIDA COM O PROTÓTIPO.

Após realizar o experimento, verificou-se que a área efetiva do detector não foi suficiente para registrar a imagem de todo o espectro do visível. Para resolver este problema é necessário efetuar a substituição da rede de difração por uma que possua menor poder de dispersão, procedimento que não foi realizado devido ao fato de não possuir outra rede de difração havendo a necessidade de se efetuar uma nova aquisição. Dada a impossibilidade de se registrar todo o fluxo de REM difratado, apenas um trecho foi estudado (Figura 81).

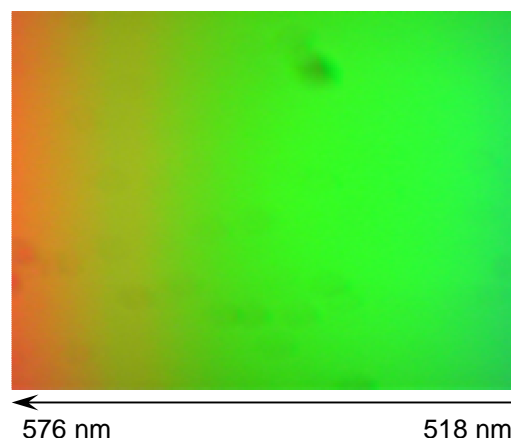


FIGURA 81 – IMAGEM DA FAIXA ESPECTRAL REGISTRADA.

A definição das posições das faixas espectrais foi realizada utilizando um espectrofotômetro como fonte de luz monocromática. Sua fenda de saída foi ajustada a 150 μm , e a resolução espectral a 0,3 nm. O fluxo de radiação emitido pelo equipamento foi incidido diretamente sobre o protótipo. Para evitar a saturação do detector, a intensidade do fluxo de radiação foi regulada.

O primeiro teste realizado foi para definir os comprimentos de onda registrados pelo detector. Os resultados indicaram que o detector registrou os comprimentos de ondas de 518 nm a 576 nm.

Após identificar a região do espectro eletromagnético registrada, obteve-se imagens do espectro, em intervalos de 5 nm, resultando em um conjunto de 24 imagens, sendo 12 da fenda do espectrofotômetro (objeto) e 12 do fluxo de radiação difratado.

Nas imagens da fenda de abertura do espectrofotômetro foi observado um rápido alargamento formando regiões brilhantes e escuras na borda, sendo este efeito provocado pelas aberrações da lente. A Figura 82 representa a imagem da fenda do espectrofotômetro regulado para emitir o comprimento de onda 540 nm.

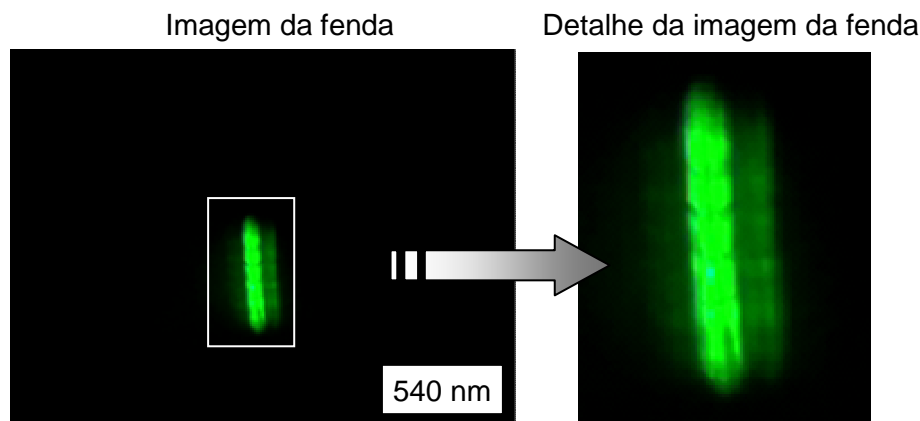


FIGURA 82 – IMAGEM DA FENDA DE ABERTURA DO ESPECTROFOTÔMETRO AJUSTADO PARA EMITIR O COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM.

A análise das características da aberração monocromática observada na imagem (Figura 82) revela a existência de aberração esférica (devida à lente) (HECHT, 2012).

Este efeito também foi observado na imagem que representa o fluxo de REM difratado, sendo neste mais acentuado (Figura 83). A imagem real da fenda deveria ser a linha fina vertical como se observa aproximadamente no meio da mancha colorida da Figura 83, sendo que a mancha é a contribuição da aberração esférica (HECHT, 2012).

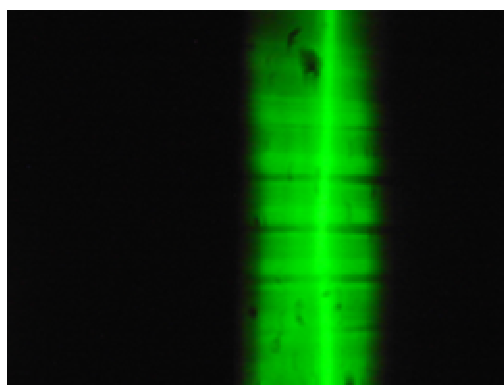


FIGURA 83 – IMAGEM D FLUXO DE REM DE COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM DIFRATADO.

A imagem do fluxo de REM difratado (Figura 83), ou seja, detectado pelo nosso protótipo, apresenta alta intensidade na região central e uma diminuição nas bordas, como foi analisado. Para ilustrar este efeito, a imagem foi decomposta em suas componentes R, G e B.

Com as bandas decompostas, efetuou-se o cálculo do valor médio do ND de cada coluna da imagem. Ao final do processo, foram obtidos 640 valores médios do ND por banda, plotados em um gráfico, no qual a abscissa representa as colunas, e a ordenada, o valor médio do ND de cada coluna (Figura 84).

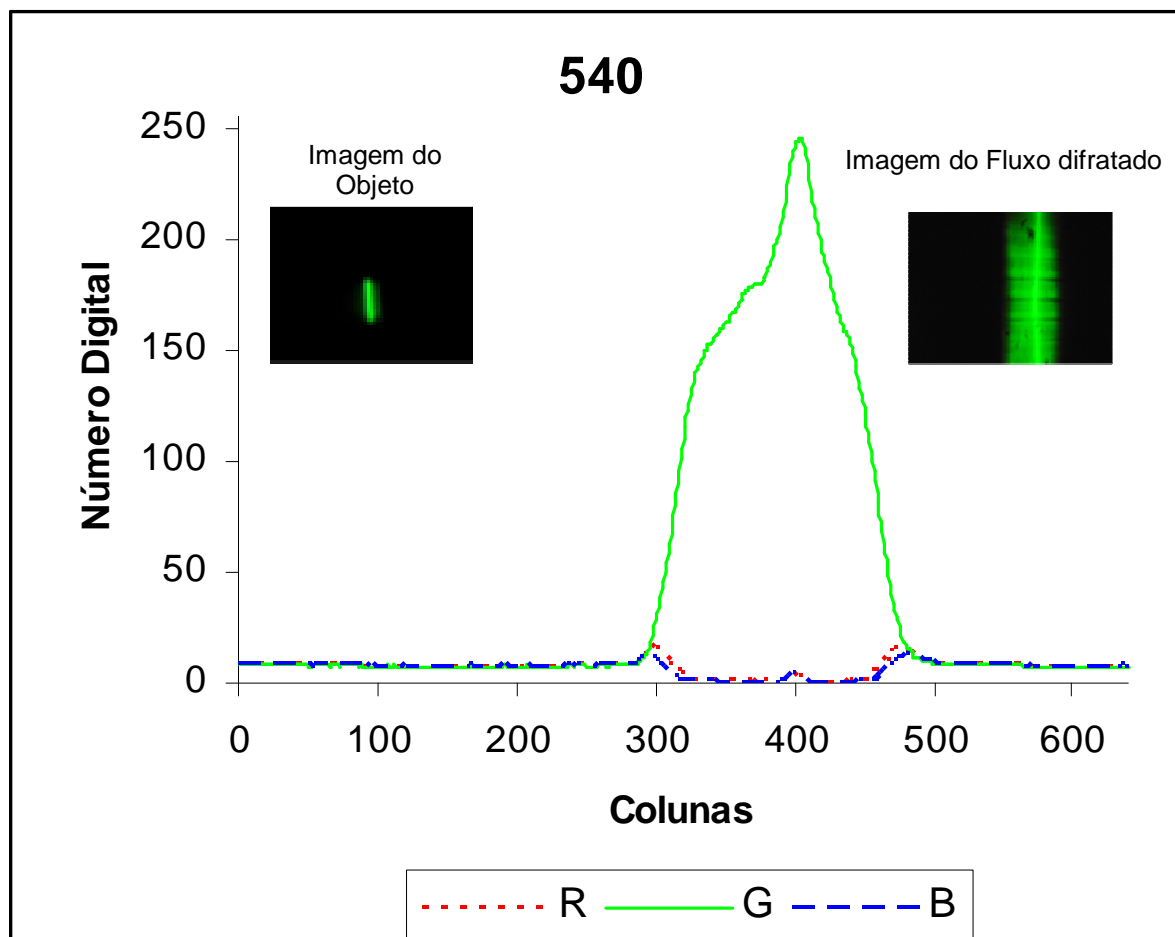


FIGURA 84 – COLUNAS E BANDAS SENSIBILIZADAS PELO FLUXO DE REM DE COMPRIMENTO DE ONDA 540 NM.

No gráfico apresentado na Figura 84, a linha vermelha representa os valores médios da banda do vermelho, a linha verde, os valores da banda do verde e a linha azul, os valores da banda do azul. Verificou-se que apenas a banda do verde foi sensibilizada pelo comprimento de onda 540 nm, conforme esperado. Os valores apresentados nas demais bandas são oriundos do efeito da geração térmica, os quais foram considerados zero na presente análise.

Analizando-se o gráfico apresentado na Figura 84, constatou-se um pico de maior intensidade que corresponde à zona de maior brilho conforme pode ser observado na Figura 84. Este pico representa a posição das colunas que registra o comprimento de onda 540 nm, sendo os demais ruídos provocados pela aberração esférica. Para a definição das colunas que representam as faixas espectrais, somente foi considerada a região de pico dos gráficos.

Este critério foi utilizado após certificar que ao aumentar a intensidade do fluxo de radiação emitido pelo espectrofotômetro, através da abertura da fenda de saída do monocromador Beckmann, os pixels destas colunas saturaram e os demais não (Figura 85).



FIGURA 85 – IMAGEM DA FENDA DE ABERTURA DO ESPECTROFOTÔMETRO COM A INTENSIDADE DO FLUXO DE REM AUMENTADA.

Este comportamento também foi observado na imagem do fluxo de radiação difratado conforme indicado na Figura 86.

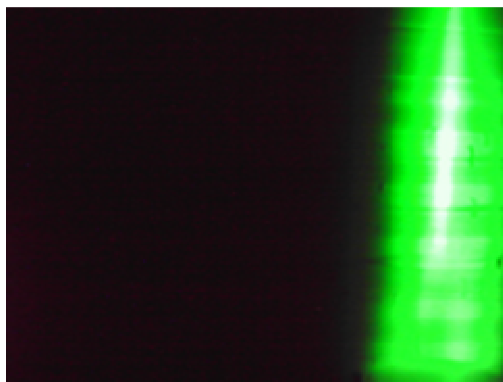


FIGURA 86 – IMAGEM DO FLUXO DE REM DIFRATADO APÓS AUMENTAR SUA INTENSIDADE.

Para uma análise mais concisa, os valores oriundos da aberração da lente foram removidos. Os valores resultantes foram plotados em um gráfico, no qual a abscissa representa as colunas, e a ordenada, o valor do ND médio de cada coluna (Figura 87).

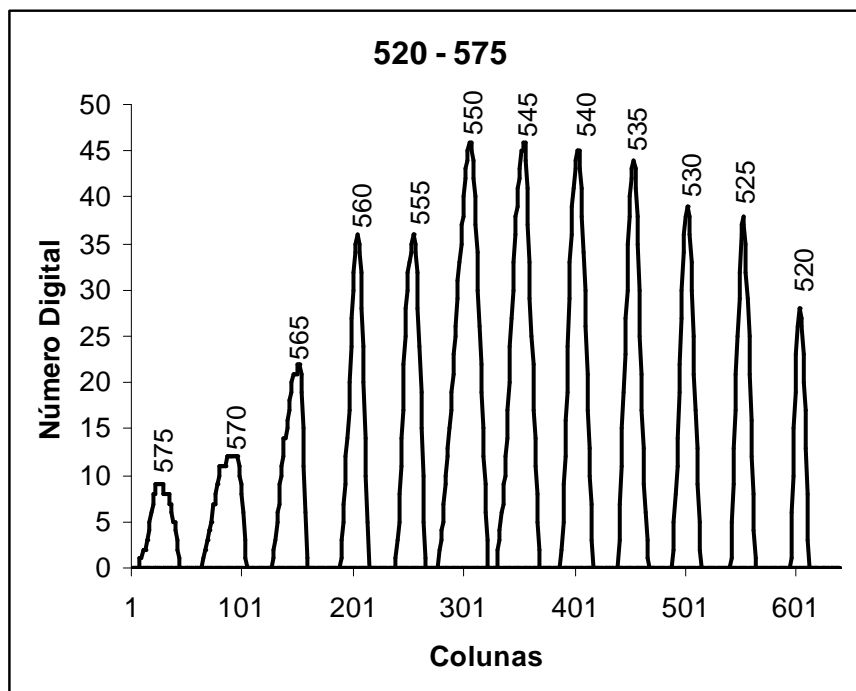


FIGURA 87 VALORES APÓS A ELIMINAÇÃO DOS DADOS ORIUNDAS DA ABERRAÇÃO ESFÉRICA.

A intensidade do fluxo de REM emitido pela fonte foi constante para todos os comprimentos de onda. No entanto, a Figura 87 indica uma descontinuidade na intensidade do fluxo de REM emitido pela fonte. A descontinuidade observada resulta do efeito da interação da REM com os filtros de radiação visível passa faixa que foram colocados pelo fabricante sobre o detector para individualizar a faixa espectral do azul, do verde e do vermelho, sendo estes filtros denominados filtros de Bayer.

Com o objetivo de determinar a função de resposta dos filtros de radiação visível dispostos sobre o CCD da Câmara SONY DSC – F828, Tavares Jr. et al. (2010) propuseram um método empregando um espectrofotômetro - Beckman Acta

MIV (UV – *Visible Spectrophotometer*) e uma esfera integradora - modelo 2500. A Figura 88 esboça o resultado alcançado pelos autores.

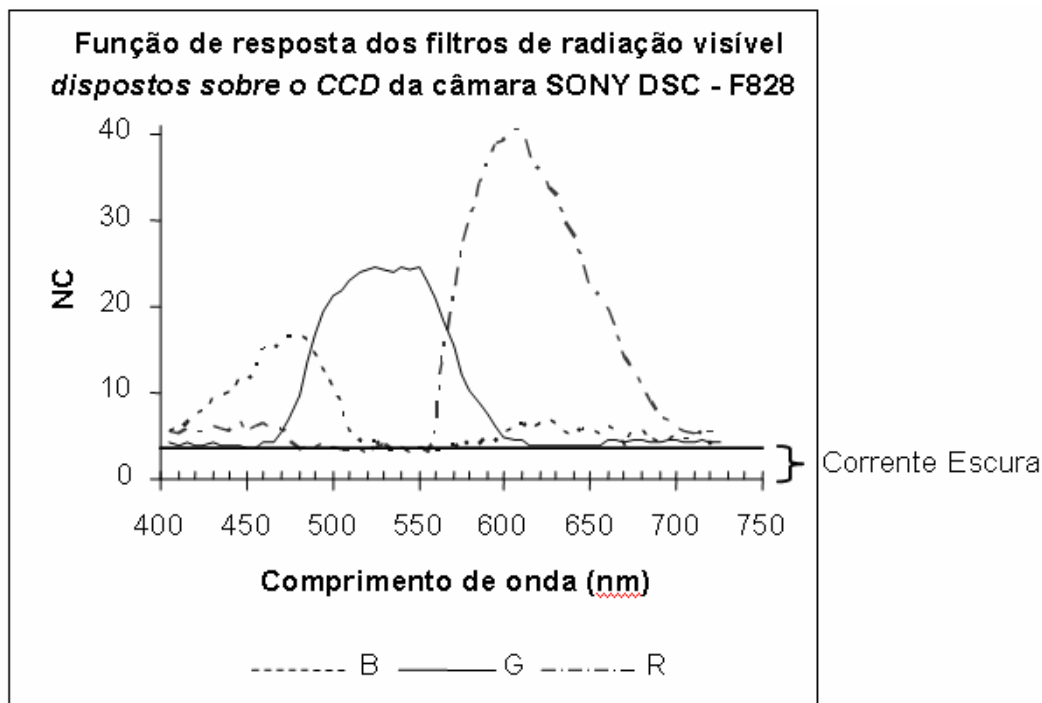


FIGURA 88 – GRÁFICO REPRESENTANDO A FUNÇÃO DE RESPOSTA DOS FILTROS DE RADIAÇÃO VISÍVEL DISPOSTOS SOBRE O CCD DA CÂMARA DSC – F828.

FONTE: Tavares Jr. et al. (2010)

Na Figura 89 foi indicada a faixa de REM registrada pelo protótipo sobre o gráfico que representa a função de resposta dos filtros de radiação visível apresentada na Figura 88, sendo esta representada pela área hachurada.

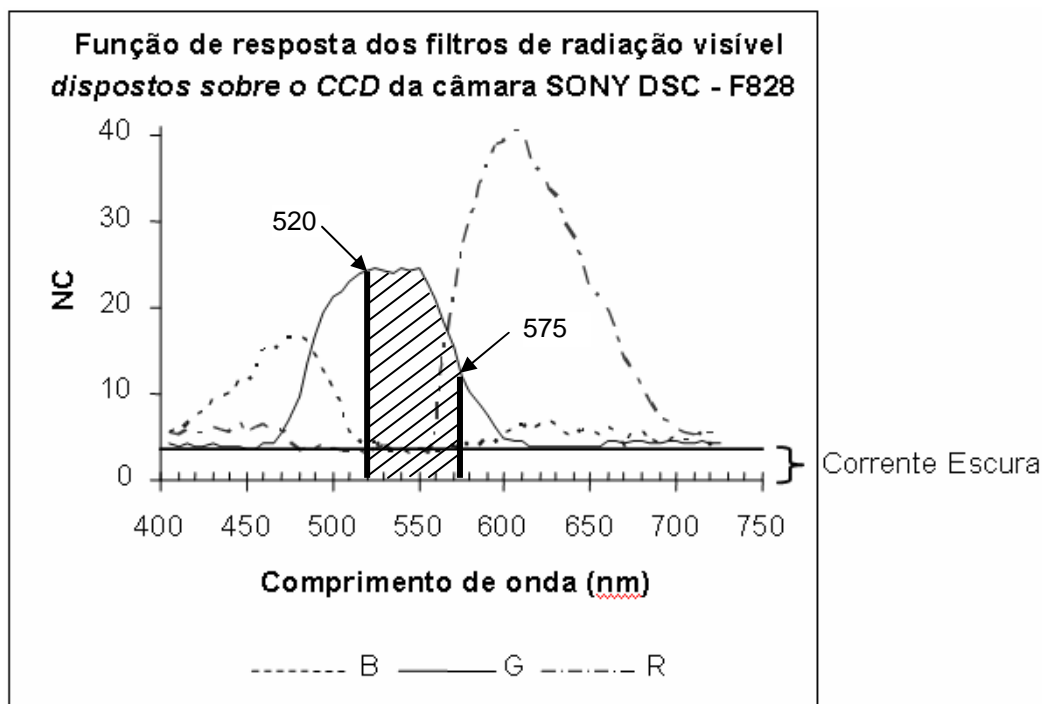


FIGURA 89 – GRÁFICO REPRESENTANDO A FUNÇÃO DE RESPOSTA DOS FILTROS DE RADIAÇÃO VISÍVEL DISPOSTOS SOBRE O CCD DA CÂMARA DSC – F828, COM A FAIXA ESPECTRAL REGISTRADA PELO PROTÓTIPO SOBRE O MESMO.

FONTE: Tavares Jr. et al. (2010)

Na Figura 89 observa-se que, à medida que aumenta o comprimento de onda, a intensidade do fluxo de REM transmitida pelo filtro diminui, sendo este comportamento observado na Figura 87. No entanto, estas diferenças são compensadas ao efetuar a normalização dos resultados. Sendo assim, não houve a necessidade de determinar a função de resposta dos filtros de radiação visível do detector responsável pelo registro do fluxo de REM difratado.

Observando a Figura 87, verifica-se que todos os picos seguem a distribuição de Gauss. Assim, para definir a amplitude de cada faixa espectral, estes valores foram ajustados à forma Gaussiana e, em seguida, aplicou-se o critério FWHM para definir a amplitude nominal das faixas (Tabela 06).

TABELA 06: POSIÇÃO E LARGURA DAS FAIXAS ESPECTRAIS.

Comprimento de onda (nm)	Coluna central de cada faixa (nm)	Largura (nm)	Offset	Altura
520	604	8,23	-0,02	29,42
525	553	10,25	-0,02	38,65
530	502	11,26	-0,02	40,24
535	453	12,05	-0,03	44,81
540	403	13,44	-0,04	47,11
545	353	16,21	-0,03	46,48
550	304	19,58	-0,03	45,83
555	254	12,46	-0,03	37,96
560	204	11,29	-0,02	36,70
565	147	15,41	-0,02	22,53
570	88	20,44	-0,02	13,21
575	28	17,67	-0,01	9,58

Na Tabela 06 a coluna 1 indica o comprimento de onda, e a coluna 2 indica o centro das colunas em que cada comprimento de onda é incidido no detector. Nas colunas 3, 4 e 5 são representados os valores obtidos com a aplicação do critério FWHM.

De acordo com os resultados apresentados na coluna 3 da Tabela 06, a largura média das faixas é de 14,02 colunas. A variação da largura das faixas se deve a efeitos de distorções da lente. Para eliminar este efeito, é necessário utilizar uma lente de melhor qualidade.

O número de colunas e a posição das colunas que registram os comprimentos de onda descritos na coluna 1 da Tabela 06 demonstraram que havia colunas ociosas. Para verificar a possibilidade de efetuar o registro de comprimentos de ondas intermediários, o número de colunas livres entre dois comprimentos de onda foi dividido pela quantidade de colunas necessárias para registrar cada comprimento de onda. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de-se registrarem dois comprimentos de ondas intermediários.

Assim, a faixa espectral de 518 nm a 576 nm foi dividida em 36 partes, sendo cada uma delas registrada em 14 colunas da imagem, proporcionando uma resolução espectral efetiva de 1,7 nm. Esta resolução foi superior à fornecida pelo espectrorradiômetro Spectron SE590 e pelo ASD FildSpec que é de 8 nm e 3 nm, respectivamente.

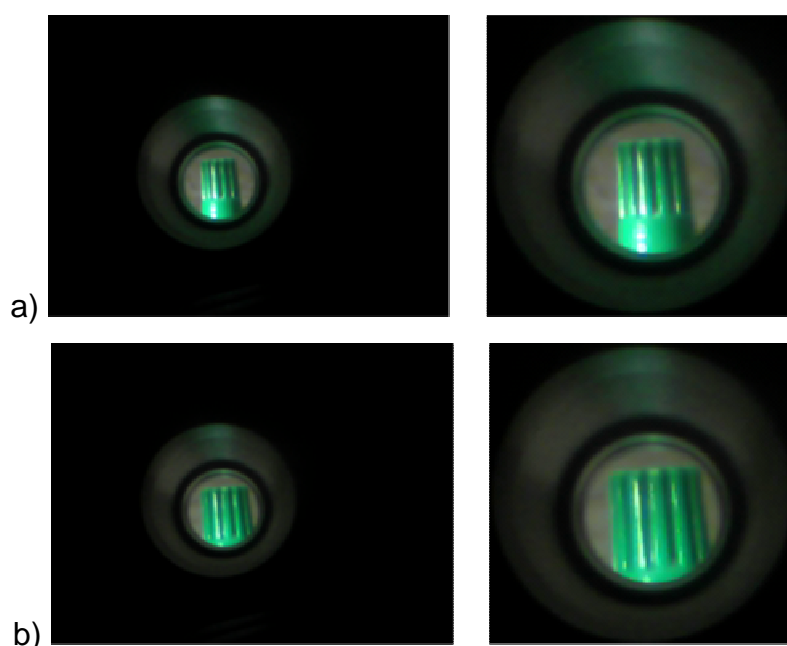
No que se refere à resolução espectral, os resultados indicaram que o protótipo apresenta bom desempenho. No entanto, a amplitude da faixa espectral detectada é muito pequena, o que impede a sua aplicação na caracterização da resposta espectral dos objetos de interesse para o Sensoriamento Remoto, por exemplo, pavimentos, cobertura de edificações; havendo, assim, a necessidade de se efetuarem mudanças na parte óptica para que seja possível registrar uma faixa espectral de maior amplitude.

Além da mudança na parte óptica do protótipo, também é necessário efetuar acertos no sistema de lente que coleta a imagem do objeto em estudo e diminuir o peso do protótipo. Ao solucionar estes problemas, o protótipo permitirá visualizar e gravar a imagem do objeto em estudo e visualizar os resultados em campo.

4.16 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.16.1 Avaliação do Sistema de Visualização do Objeto em Estudo

A performance do sistema desenvolvido para capturar a imagem do objeto foi avaliada posicionando-se um objeto afastado a 5 cm, 20 cm e 40 cm da lente coletora de REM (Figura 90).



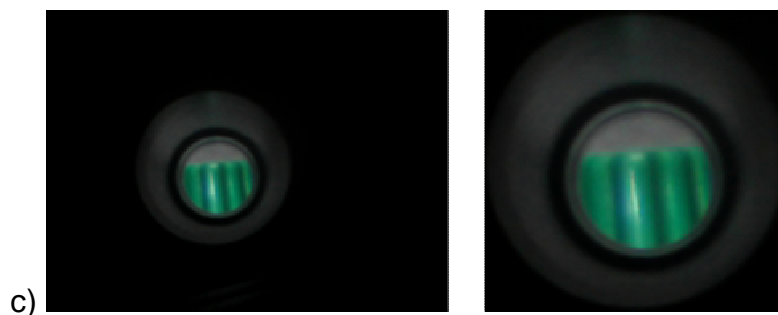


FIGURA 90 – IMAGENS DE UM OBJETO POSICIONADO A 5 cm (a), 20 cm (b) E 40 cm (c) DA LENTE COLETORA DE REM.

Os resultados obtidos nesta figura mostram que a imagem formada é real e não invertida, sendo reduzida quando o objeto está próximo da lente e ampliada ao ser afastado.

Este processo ocorre devido à presença de uma segunda lente, ou seja, da lente da WebCam empregada na concepção do sistema de imageamento do objeto.

De acordo com Hecht (2002), é comum encontrar este fato quando se empregam sistemas com duas lentes para captar imagens. O autor apresentou uma equação que permite efetuar o cálculo rápido da posição da imagem obtida. Pela análise da equação apresentada por este autor, verifica-se que com ela pode-se tornar possível definir a composição, e tipo, a distribuição das lentes e o afastamento do objeto à lente, para se formar a imagem na dimensão desejada.

Entretanto, a aplicação desta equação não foi efetuada, devido ao fato de o manual da WebCam utilizada não fornecer as características da lente. Estas características podem ser obtidas em laboratório, no entanto, constitui um procedimento laborioso e pouco confiável, uma vez que a distância focal destas lentes é pequena exigindo instrumentos de alta precisão para efetuar suas medidas.

4.16.2 Sensitividade do Protótipo

A sensibilidade do protótipo, foi avaliada utilizando uma lanterna comercial à base de LEDs como fonte de REM. A Figura 91 apresenta a imagem do fluxo de REM com Baixa (a) e Alta (b) intensidade.

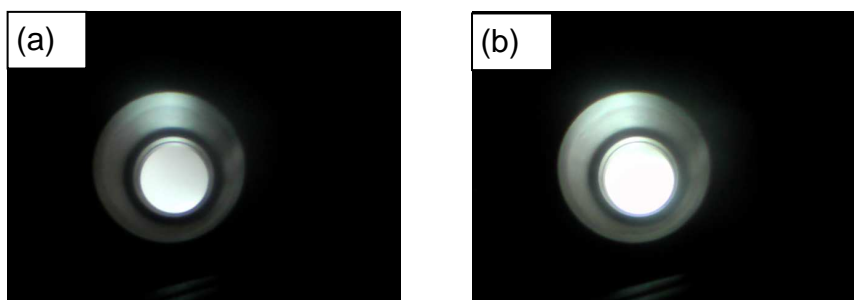


FIGURA 91 – IMAGEM DA INTENSIDADE DO FLUXO DE REM UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO.

As imagens da intensidade do fluxo de radiação difratado são apresentadas na Figura 92, onde se tem: Imagem com baixa (a) e alta (b) Intensidade.

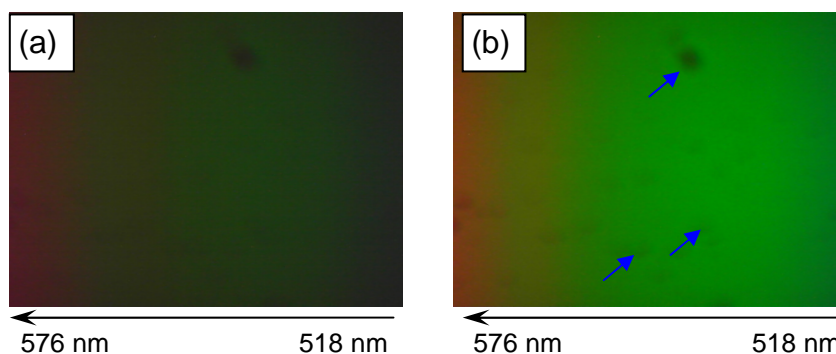


FIGURA 92 – IMAGEM DA INTENSIDADE DO FLUXO DE REM DIFRATADO UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO ONDE AS SETAS EM AZUL INDICAM ALGUNS DOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS SOBRE O DETECTOR.

As manchas escuras nas imagens (Figura 92) são oriundas de partículas acumuladas sobre o sensor. Estas partículas foram depositadas sobre o detector durante a montagem do equipamento. Para realizar a limpeza do detector é necessário ter muita atenção e utilizar material adequado. Caso a limpeza seja mal conduzida, o ato pode causar danos irreversíveis. Devido ao fato de não se dispor de material adequado, a limpeza não foi executada.

Cada elemento do detector gera um valor digital (ND) proporcional à intensidade do fluxo de REM que o atinge, ou seja, quanto maior a intensidade do fluxo de REM maior o valor do ND gerado. Os valores altos resultam em imagens claras, e os baixos resultam em imagens escuras (Figura 92 a e b). Isso ocorre devido à quantidade de carga gerada em cada elemento do detector ser proporcional à

intensidade do fluxo de REM que o atinge, ou seja, quanto maior for a intensidade do fluxo de REM, maior será o valor do ND (Figura 93).

Após efetuar o registro das imagens, foi realizada a correção do efeito da corrente escura, a eliminação dos pontos *blemishes* e a individualização das faixas espectrais. Os valores obtidos foram esboçados em gráficos nos quais a abscissa representa o comprimento de onda e a ordenada a sua intensidade, dada em ND. Na Figura 93, há o gráfico do fluxo de radiação de acordo com a intensidade em função do comprimento de onda.

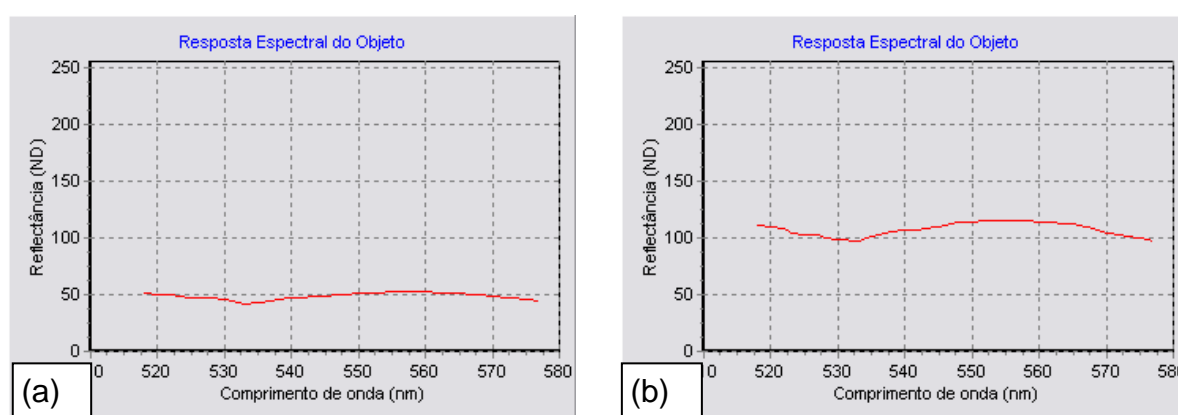


FIGURA 93 – REPRESENTAÇÃO EM GRÁFICO DO FLUXO DE REM DIFRATADO UTILIZADO PARA TESTAR A SENSITIVIDADE DO PROTÓTIPO. FLUXO COM BAIXA INTENSIDADE (A) E ALTA INTENSIDADE (B).

Em ambos os gráficos (Figura 93) existe uma curva suave com pequeno máximo por volta dos 550 nm - 560 nm. Este pico se reproduz com o aumento da intensidade luminosa. Por outro lado, a medida do background aumenta, de aproximadamente, de 50 ND para, aproximadamente, 125 ND com o aumento da intensidade luminosa da lanterna, resultado que também está de acordo com o que se esperaria. Este resultado é reproduzível e consistente com o que se espera nesta situação, pois o aumento na intensidade de emissão dos LEDs não leva a mudanças espectrais significativas, apenas a variação positiva do background como verificado.

Para definir a curva da resposta espectral de um dado objeto é necessário seguir os seguintes passos:

- 1) Incidir o fluxo de REM emitido pela fonte em uma superfície isotrópica e, em seguida, registrar a intensidade do fluxo de REM refletido pela mesma.

- 2) Substituir a superfície isotrópica pelo objeto que deseja conhecer o comportamento da interação da REM com a sua superfície e, em seguida, registrar a intensidade do fluxo de REM refletido pelo mesmo,
- 3) Efetuar a normalização dos valores.

Como resultado das operações obtém-se a curva que descreve o comportamento da interação do fluxo de REM com o objeto em estudo. No entanto, estas operações não foram realizadas por não se dispor de uma superfície isotrópica confiável até o momento. Acredita-se, com base nos resultados obtidos até o momento, que a utilização do protótipo nestas condições repetirá os bons resultados obtidos anteriormente.

As superfícies isotrópicas mais conhecidas e utilizadas nesta área são placas revestidas com sulfato de bário e/ou constituídas por um material denominado *spectralon*. De posse deste material, será possível executar as operações citadas, determinando o comportamento espectral do objeto “*in loco*” (Figura 94).



FIGURA 94 – MEDIDA DO FLUXO DE REM REFLETIDO POR UMA SUPERFÍCIE ISOTROPICA.

FONTE: Milton et al. (2007)

A Figura 94 representa uma operação em campo empregando-se um espectrorradiômetro de campo comercial. Nesta figura, o operador está registrando a intensidade do fluxo de REM refletido por uma superfície isotrópica que foi emitido pelo Sol.

4.17 CUSTO FINAL DO PROTÓTIPO DE ESPECTRORRADIÔMETRO DESENVOLVIDO

O custo dos materiais empregados no desenvolvimento do protótipo de espectrorradiômetro foi de R\$ 1.031,75 e a mão de obra da usinagem das peças foi de R\$ 450,00, sendo estes apresentados na Tabela 07.

TABELA 07: MATERIAIS EMPREGADOS NA CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO COM SEUS RESPECTIVOS PREÇOS.

Produto	Quantidade	Valor Unit. (R\$)	Valor Total (R\$)
LED 5mm	10	0,15	1,50
Resistor	16	0,20	3,20
Capacitor	6	0,15	0,90
Diodo 1N4007	2	0,09	0,18
Terminal PCI	4	0,10	0,40
Terminal PCF	4	0,10	0,40
CI – L7805	1	0,87	0,87
CI – IRFZ44	2	1,90	3,80
Chave Tactil	1	0,25	0,25
Cristal 20MHz	1	0,75	0,75
Termistor	1	1,90	1,90
PIC18F4550	1	26,90	26,90
Placa de circuito impresso	1	2,10	2,10
Percloroeto de ferro 500ml	1	6,80	6,80
Pastilha termoeletrica	2	26,00	52,00
WebCam Dot Store	1	40,00	40,00
WebCam EROS	1	20,00	20,00
Lente biconvexo	1	5,00	5,00
Lente Plano Convexo	1	230,00	230,00
Espelho semi-transparente	1	86,80	86,80
Rede de difração	1	357,40	357,40
Chapa de Alumínio	1	90,00	90,00
Usinagem das peças	Serviço	450,00	450,00
Caixa de acondicionamento	1	60,00	60,00
Lixa	2	1,00	2,00
Tinta spray Preto Fosco	2	18,00	36,00
Lâmina de barbear	4	0,65	2,60
Total			1.481,75

O espelho semi-transparente, a lente plano convexa e a rede de difração foram adquiridos no mercado externo, sendo estes materiais responsáveis por 39,64% do valor despendido na concepção do protótipo. A opção em importar estes produtos se deu pelo fato de o preço no mercado interno ser superior ao externo.

Ao se comparar o valor do espectrorradiômetro ASD FieldSpec que custa cerca de R\$ 127.599,98 (cerca de U\$ 65 mil dólares), verifica-se que o valor despendido com materiais na construção do protótipo equivale a 1,16% do valor de um produto comercializado mundialmente.

Em acréscimo, o capital gasto na concepção do protótipo corresponde a 14,69% do valor cobrado para se efetuar a manutenção deste equipamento, que somente é realizada pela empresa que o fabrica.

4.18 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE O PROTÓTIPO

Durante a fase de projeto do protótipo, levantou-se a possibilidade de utilização de um CCD comercial em vez de um sensor de Webcam para registrar o espectro difratado pela rede de difração. Devido ao tamanho extremamente reduzido da Webcam empregada, apenas uma parte pequena do espectro visível foi detectada nesta montagem inicial: 518 nm a 576 nm. Entretanto, acredita-se que este intervalo já valida os resultados obtidos, e o uso de um sensor CCD com dimensões maiores (algo em torno de 5 a 7 vezes maior, como disponível no mercado) permitiria aumentar o intervalo espectral envolvendo boa parte do espectro visível, assim como permitiria uma sensibilidade maior à intensidade difratada. Um reposicionamento do sensor permitiria medir faixa espectral mais ampla, porém com riscos de piorar a resolução espectral. Contudo o presente protótipo apresenta melhor resolução que os equipamentos comerciais, o que, em princípio, permitiria tal liberdade. Assim, a inserção de um dispositivo CCD e o reposicionamento do sensor poderão fazer com que a faixa espectral seja aumentada de forma a cobrir grande parte do espectro visível, mantendo-se a simultaneidade entre registro de imagem e espectro de emissão dos objetos estudados.

A seguir serão apresentadas as conclusões e recomendações.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi construir um espectrorradiômetro de baixo custo, visando à confecção de um equipamento eficiente na obtenção da resposta espectral dos objetos com operação na faixa espectral do visível, e resolução espectral de até 10 nm, para funcionar em campo e em escritório, e que permita visualizar e registrar a imagem do objeto em estudo.

Após o desenvolvimento do trabalho proposto, as conclusões alcançadas podem ser assim resumidas:

- Desenvolveu-se um sistema de refrigeração baseado numa pastilha termoelétrica, que possibilitou estabilizar a geração de corrente escura no detector do fluxo de REM difratado. O sistema foi calibrado e desenvolveram-se um *hardware* e *software* de controle automatizado, sendo este sensível a uma variação de 0,07 °C na temperatura.
- O sistema mecânico do protótipo foi projetado e construído, tendo sido aprovado nos testes de alinhamento.
- Foi realizado o levantamento dos coeficientes de correção do efeito da corrente escura e identificação dos pontos *blemishes*, mantendo a temperatura do detector estabilizada em $20,0\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$. Os pontos *blemishes* foram identificados nas três bandas (R, G e B) e foi elaborado um mapa de correção dos pixels defeituosos para uso posterior no tratamento das imagens.

Empregando um espectrômetro como fonte de luz monocromática, foi realizada a calibração do protótipo e a determinação de sua região espectral. Devido ao fato de a dimensão da área efetiva do detector empregado para registrar o fluxo de REM difratado ser pequena, somente foi possível registrar os comprimentos de onda na faixa espectral de 518 nm a 576 nm. Os resultados obtidos no experimento realizado para definir a posição das bandas espectrais e sua resolução espectral efetiva foram analisados e, em seguida, aplicou-se o critério FWHM para definir a amplitude das bandas espectrais, sendo obtido um valor de 1,7 nm para a amplitude

nominal das bandas. Assim, a faixa espectral de 518 nm a 576 nm pode ser dividida em 36 (trinta e seis) bandas espectrais:

- A resolução espectral efetiva obtida pelo protótipo mostrou-se previamente superior à resolução fornecida pelos equipamentos comerciais comentados na introdução (Spectron SE590 e do ASD FieldSpec).
- A avaliação de imageamento do objeto (concomitante com a aquisição da informação espectral) mostrou-se parcialmente inadequada, porém tal situação pode ser consertada com uma reestruturação do sistema óptico do sistema de imageamento do objeto.
- Experimentos para averiguar a sensibilidade do detector responsável pelo registro do fluxo de REM difratado mostraram que o protótipo possui boa sensibilidade à variação da intensidade do fluxo de REM.
- Ao todo foram gastos R\$ 1.481,75 para efetuar a montagem do protótipo. Este valor equivale a 1,16% do custo do espectrorradiômetro ASD FieldSpec.
- Finalmente, no quesito visualização dos resultados em campo, o protótipo desenvolvido apresenta a vantagem de disponibilizar um sistema que permita ao operador visualizar tanto as informações registradas quanto a imagem do objeto *in-loco*, permitindo ao operador averiguar a qualidade dos dados coletados e optar por salvá-los ou não.

De fato, acredita-se que os objetivos da proposta original deste projeto de doutorado foram atingidos em sua totalidade. O protótipo construído apresentou características excelentes em termos de operacionalidade, resolução e portabilidade. Pequenas modificações no protótipo poderiam ser realizadas num futuro próximo, e isto será apontado na próxima seção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento deste trabalho, alguns problemas que ficaram em aberto podem fomentar a realização de trabalhos futuros. A seguir são listados

alguns itens necessários para se obter melhores resultados. Cabe ressaltar que boa parte dos itens já está em fase de estudo para a continuidade da pesquisa:

- Empregar um detector linear do tipo CCD que possua maior área efetiva para registrar todo o espectro do visível.
- Montar um novo sistema de lentes para efetuar o registro da imagem do objeto.
- Utilizar uma lente de melhor qualidade para efetuar a coleção do fluxo de REM.
- Eliminar a lente que focaliza o fluxo de REM difratado no detector, com a finalidade de eliminar ruídos oriundos das aberrações cromáticas.
- Efetuar a otimização do algoritmo de individualização das faixas espectrais.
- Desenvolver um campo no aplicativo de interface e processamento de dados para armazenar o fluxo de REM refletido pela superfície isotrópica.
- Desenvolver um comando para efetuar a normalização dos valores obtidos.
- Reduzir as dimensões do protótipo.
- Reduzir o peso do protótipo.
- Desenvolver cabos para ligar o protótipo em baterias.
- Desenvolver conexão USB para transferir as temperaturas aferidas pelo hardware ao microcomputador.
- Desenvolver um campo para registrar e apresentar a variação da temperatura durante o período de operação do sistema.

6 PUBLICAÇÕES E TRABALHOS EM ANDAMENTO

Artigo em revista

- TAVARES Jr., J.B.; RIBEIRO, E.; SANTOS, D. R.dos *Estabilização da temperatura da câmara digital Magi DC575 utilizando pastilha termoeletrica para obtenção dos parâmetros de correção do efeito da corrente escura. Revista Brasileira de Cartografia* Nº 63/03, p. 361–375, 2011.
- TAVARES Jr., J.B.; Santos, D. R. dos; Ponzoni, F. J.; Dalmolin, Q.; Antunes, A. F. B. *Deteção da propagação urbana da erva-de-passarinho (Loranthaceae sp) utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Revista Brasileira de Cartografia* Nº 63/04, p. 591-598, 2011.
- TAVARES JR., J. B.; RIBEIRO, E.; SANTOS, D. R. dos; PONZONI, F. J. *Técnica para determinar a função de resposta dos filtros de radiação visível das câmaras digitais. Bol. Ciênc. Geod.*, Curitiba, v. 16, nº 2, p.277-294, abr-jun, 2010.
- TAVARES JR., J. B.; CENTENO, J. A. S. *Segmentação multiresolução de imagens fusionadas*. Artigo aprovado e aceito para a publicação na **Revista Brasileira de Cartografia**, estando programado para o número 65/ESPECIAL SENSORIAMENTO REMOTO, agosto/ 2012.

Artigo completo em evento

- TAVARES JR., J. B.; SANTOS, D. R. dos; RIBEIRO, E. Erro de classificação de imagens inerentes ao efeito da corrente escura. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, 8-11 de setembro de 2008.

Resumo expandido

- TAVARES JR., J. B.; SANTOS, D. R. dos; RIBEIRO, E. Sistema sensor imageador digital - caracteristica e princípio do funcionamento. VII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 11 a 15 de setembro de 2011.

- TAVARES JR., J. B.; PINTO, H. R. S.; GOMES, C. S. Impacto da reamostragem na resposta espectral dos objetos. VII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 11 a 15 de setembro de 2011.
- TAVARES JR., J. B.; RIBEIRO, E; SANTOS, D. R. dos; PONZONI, F. J. Uso do LED como fonte de radiação eletromagnética para calibração radiométrica em laboratório de sensores imageadores. VI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 03 a 06 de novembro de 2009.

Titulo proposto para artigo em andamento

- Automação do sistema de refrigeração e monitoramento da temperatura de sensor CCD;
- Desenvolvimento de um software para coletar e processar dados de um protótipo de espectrorradiômetro;
- Desenvolvimento de um protótipo de espectrorradiômetro utilizando detectores de webcam;
- Estudo da possibilidade de remoção do filtro de Bayer de detectores de webcam;
- Calibração radiométrica do protótipo de espectrorradiômetro;

Titulo proposto para capítulo de livro em andamento

- Sensor CCD: Princípios Básicos de funcionamento e principais ruídos.

BIBLIOGRAFIA

- ASNER, G. P. et al. *Remote sensing of native and invasive species in Hawaiian forests*. **Remote Sensing of Environment** 112, 1912–1926, 2008.
- BARBE, D. F. *Imaging devices using the charge coupled concept*. **Proc. IEEE**, v. 63, p 38 – 67. 1975.
- BELLINASSO, H. et al. *Spectral library and its use in soil classification*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 34, p. 861-870, 2010.
- BEN-DOR, E. et al. *Using imaging spectroscopy to study soil properties*. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 538-555, 2009.
- BEYNON, J. D. E.; LAMB, D. R. **Charge coupled devices and their applications**. McGraw-Hill, London, 275p., 1980.
- BOCKAERT, V. **Sensors**. IN: Digital Photography Review. Disponível em: <http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera_System/sensors_01.htm> Acesso em: 24 de junho de 2008.
- BOYLE, W. S. e SMITH, G. E. **Charge coupled semiconductor devices**. Bell Syst. Tech. J.. v.49; p 587 – 593. 1970. [Bell Laboratories, Murray Hill, NJ].
- BOYLESTAD, R. e NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 6. ed. – Rio de Janeiro: JC, 1998. Original: Electronic Devices and Circuit Theory, Traduzido por Guimarães, A. G. e Oliveira, L. A. da.
- BRODERSEN, R.; BUSS, D. D.; JR, A. F. T. *Experimental characterization of transfer efficiency in charge coupled devices*. **IEEE - Charge Coupled Devices: Technology and Applications**, 1977. Reprinted from IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-22, pp. 40-46, Feb. 1975.
- CARNES, J. E.; KOSONOCKY, W. F. *Noise source in charge coupled device*. **IEEE - Charge Coupled Devices: Technology and Applications**, 1977. Reprinted from RCA Rev., vol. 33, pp. 327-343, June 1972.
- CASSIGNOL, E. J. **Semicondutores física e eletrônica**. IBRAPE. 345p. 1967.
- CHOE, E. et al. *Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain*. **Remote Sensing of Environment** 112, 3222–3233, 2008.
- CLARK, R. N.: Chapter 1: *Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy*, in *Manual of Remote Sensing*, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A. N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3 – 58, 1999.

COLOMBO, R. et al. *Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling*. **Remote Sensing of Environment** 112, 1820–1834, 2008.

COMBE, J.-Ph. et al. *Analysis of OMEGA/Mars Express data hyperspectral data using a Multiple-Endmember Linear Spectral Unmixing Model (MELSUM): Methodology and first results*. **Planetary and Space Science** 56, 951–975, 2008.

CRECRAFT, D.I.; GORHAM, D.A. e SPARKES, J.J. **Electronics**. London, 1993.

DEMATTE, J.A.M. et al. *Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects*. **International Journal of Remote Sensing** (Print), v. 31, p. 403-422, 2010.

DEVICES Inc, ANALYTICAL SPECTRAL. http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/asd_fieldspec.shtml. Acesso em 17 de junho de 2012.

DUCKWORTH, H. E. **Electricity and Magnetism**, pp. 181-182. New York: Holt, Rinehart and Winston (1960). Apud Encyclopedia of Alternative Energy & Sustainable Living. Disponível em: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/Peltier_effect.html> acesso em 12/05/2010.

FARIFTEH, J. et al. *Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN)*. **Remote Sensing of Environment** 110, 59–78, 2007.

GOETZ A.F.H. 2009. *Three decades of hyperspectral remote sensing of the earth: A personal view*. **Remote Sensing of Environment**. 113: s5-s16.

HECHT, E. **Optics**. 3 rd. ed.; 790p. 2002.

HEIDEN, U. et al. *Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data*. **Remote Sensing of Environment** 111, 537–552, 2007.

JENKINS, F.A.; WHITE, H.E. **Fundamentals of optics**. Third Edition. Kogakusha Company. 637p.; 1987.

KALACSKA, M. et al. *Hyperspectral discrimination of tropical dry forest lianas and trees: Comparative data reduction approaches at the leaf and canopy levels*. **Remote Sensing of Environment** 109, 406–415, 2007.

KLEIN, M. V. e FURTAK, T. E.. **Optics**. 2. ed. - New York: Wiley, 1986. 661p.

KOSONOCKY, W. F.; SAUER, D. J. *The ABC of CCDs*. They're basically MOS analog registers that can be employed in either analog or digital applications. Here are pointers in evaluating them. **Electron. Des.**, v. 23, p 58 – 63. 1975.

KOSONOCKY, W. F. **Charge Coupled Devices – An overview**. Western Electron. Show and Conv. Tech. Papers. V 18. p 2/1 – 2/20. 1974.

LAGACHERIE, P. et al. *Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements*. **Remote Sensing of Environment** 112, 825–835, 2008.

LATHI, B. P. **Modern digital and analog communication systems**. 3ª. ed, New York, Oxford University Press, 781p.; 1998.

LUCAS, R. et al. *Classification of Australian forest communities using aerial photography, CASI and HyMap data*. **Remote Sensing of Environment** 112, 2088–2103, 2008.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet**. 2009.

MILTON, E.J. et al. *Progress in field spectroscopy*. **Remote Sensing of Environment** 113, S92–S109, 2009.

MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores PIC18: aprenda e programe em Linguagem C**. 1. ed. – São Paulo: Érica, 400p.; 2009.

MOREIRA, M. A. et al. *Espectrorradiometria de campo no estudo do comportamento espectral e análise da eficiência do uso da radiação em 20 cultivares de trigo*. In: **X Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistema de Información Espaciais** - SELPER, 2002, COCHABAMBA -BO. CD-ROM. Cochabamba : SELPER, 2002.

MULTILASER. Disponível em: <http://www.multilaser.com.br/produtos_buscar.php> Acesso em 04 de maio de 2012.

OPTICS, E. **Reflective Ruled Diffraction Gratings**. Disponível em: <<http://www.edmundoptics.com>> Acesso em 19 de abril de 2012.

SOUSA JUNIOR, J.G.A. et al. *Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 727-738, 2008.

SHORTIS, M. R.; BEYER, H. A. *Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision*. In: **Close Range photogrammetry and machine vision**. Ed: Atiknson, K.B. Whittles Publishing, U.K., 1996.

SNYDER, G. J.; URSELL, T. S. **Thermoelectric Efficiency and Compatibility**. *Physical Review Letters*. v.91, n.14. 2003.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of semiconductor devices**. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 815 p.; 2007.

TAVARES Jr. et al. *Técnica para determinar a função de resposta dos filtros de radiação visível das câmaras digitais*. **Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos**, Curitiba, v. 16, nº 2, p.277-294, abr-jun, 2010.

TAVARES Jr, J. B.; RIBEIRO, E. e SANTOS, D. R. dos. *Estabilização da temperatura da câmara digital Magi DC575 utilizando pastilha termoelétrica para obtenção dos parâmetros de correção do efeito da corrente escura*. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 63/03, p. 361 – 375, 2011.

TAYLOR, S. A. CCD and CMOS Imaging Array Technologies - Technology Review. **Technical Report EPC-1998-106**. Disponível em: <<http://research.microsoft.com/pubs/80353/ccd.pdf>> Acesso em 19 de abril de 2012.

TOCCI, R.J. e WIDMER, N.S. **Sistemas digitais princípios e aplicações**. Tradutor José Lucimar do Nascimento. 8. ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

TURNER, L. W. **Circuitos e dispositivos eletrônicos: semicondutores, aptoeletrônica, microeletrônica**. São Paulo: Hemus, 1997.

Walsh, M. J. **Choosing and using CMOS**. 1. ed. – San Francisco: McGraw-Hill Book Company. 1986. 304p.

WALTER-SHEA, E. **Spectroradiometers**. Disponível em: <<http://snrs.unl.edu/agmet/>> Acesso em 05 de maio de 2012.